Spektrum der Wissenschaft

7.19

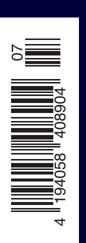
www.Spektrum.de 7.19

8,90 € (D/A/L) · 14,– sFr. D6179E
Deutsche Ausgabe des SCIENTIFIC AMERICAN

Neustart der Gentherapie

Eine gescheitert geglaubte Methode feiert ihr Comeback

IM FOKUS
Herausforderung Klimawandel





EDITORIAL
DIE ZUKUNFT UNSERES KLIMAS

Hartwig Hanser, Redaktionsleiter
hanser@spektrum.de

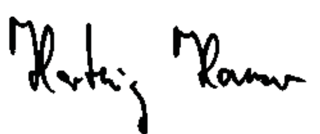
Der letzte Dürresommer ist noch allzu gut in Erinnerung, und die Grundwasservorräte sind trotz einiger ergiebiger Regenfälle hier zu Lande nicht wieder aufgefüllt. Besonders Landwirte zittern vor dem Sommer, auch wenn niemand weiß, ob es erneut zu wochenlanger Bruthitze kommt. Tatsächlich aber häuften sich in den vergangenen Jahren extreme Wetterbedingungen gerade in den Sommermonaten – in Deutschland, in Europa und darüber hinaus. So überschwemmten 2018 zeitgleich zur hiesigen Dürre massive Regenfälle den Nordosten der USA.

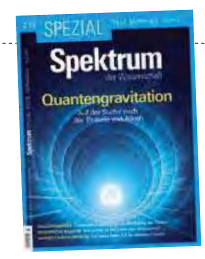
Ab S. 54 beschreibt Michael Mann, Professor für Atmosphärenforschung an der Pennsylvania State University, eine aktuelle Hypothese für diese Entwicklung: Der Jetstream, eine gewaltige Strömung in der Erdatmosphäre, die hoch oben an der Grenze zur Stratosphäre von West nach Ost zieht, schwächt sich im Sommer ab und schlägt dadurch zunehmend wellenförmig nach Süden und Norden aus. Bleiben diese Wellenberge und -täler dann längere Zeit an derselben Stelle hängen, kommt es genau dort zu solchen Wetterextremen. Neuen Studien zufolge verstärken aus der Quantenphysik bekannte Resonanzmechanismen die Ausschläge des Jetstreams noch weiter.

Die Ursache für das Phänomen sehen Forscher darin, dass sich die Arktis schneller erwärmt als unsere gemäßigten Breiten. Und das wiederum lässt sich laut Modellrechnungen auf den menschengemachten Klimawandel zurückführen. Für Michael Mann ein weiteres Argument dafür, den Ausstoß von klimaverändernden Gasen wie Kohlendioxid schnellstmöglich deutlich zu reduzieren, um die Entwicklung nicht noch zu verschlimmern. Sonst müssten wir auch in Deutschland spätestens ab 2050 mit einer weiteren dramatischen Zunahme sommerlichen Extremwetters rechnen.

An dieser Stelle hakt Richard Conniff in seinem Beitrag ab S. 62 ein. Für den Wissenschaftsautor ist der Zug in puncto CO_2-Reduktion bereits abgefahren: Sie allein wird nicht reichen. Zusätzlich müssen wir das Treibhausgas möglichst effizient aus der Atmosphäre entfernen und neutralisieren, fordert er. Conniff gibt einen umfassenden Überblick über die hierzu angedachten und zum Teil schon eingesetzten Technologien. Dazu bezieht er sich vor allem auf eine gründliche Studie der deutschen Klimaforscherin Sabine Fuss vom Berliner Mercator-Institut. Sein Fazit: Gelänge es, mehrere Ansätze optimal zu kombinieren, ließe sich die notwendige, ungeheure Menge an CO_2 wohl zu vertretbaren Kosten entfernen und die Klimaerwärmung auf diese Weise begrenzen. Dann sollte auch der Jetstream weniger ausgebremst werden – und damit hoffentlich sommerliches Extremwetter nicht zur neuen Normalität werden.

Herzlich, Ihr





NEU AM KIOSK!

Unser **Spektrum** SPEZIAL Physik – Mathematik – Technik 2.19 präsentiert aktuelle Ansätze, welche die Gravitation mit den Gesetzen der Quantenwelt zu einer »Theorie von Allem« vereinen sollen.

IN DIESER AUSGABE




THOMAS HIGHAM
KATERINA DOUKA

Die beiden Archäologen entlocken kleinsten Knochenstücken verblüffende Erkenntnisse über die Frühzeit des Menschen (ab S. 34).



MICHAEL E. MANN

Der Klimawandel bringt nicht nur heißere Sommer, sondern auch Starkregen und Überschwemmungen. Wie das mit dem Jetstream zusammenhängt und was die Quantenphysik damit zu tun hat, erklärt der Atmosphärenforscher ab S. 54.


PETRA ROTHÜTL

TOBIAS NIEDENTHAL

Finsteres Mittelalter auf der einen Seite, die Lichtgestalt Hildegard von Bingen auf der anderen – der Würzburger Medizinhistoriker kämpft ab S. 72 gegen Klischees.

INHALT

TITELBILD:
ANUSORN NAKDEE / GETTY IMAGES / ISTOCK;
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

ANUSORN NAKDEE / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



CHRISTOFFER RUDQUIST



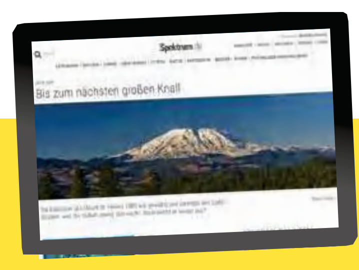
EHT COLLABORATION (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO1907A/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)



LIZ TORMES



HELMUTH SCHAM, MIT FRDL. GEN. DER STIFTUNG WELTERBE KLOSTERINSEL REICHENAU



Alle Artikel auch digital auf **Spektrum.de**

Auf **Spektrum.de** berichten unsere Redakteure täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.



VOM MARSWIND VERWEHT

Der Mars mag eine staubtrockene Wüstenwelt sein, aber von einer eintönigen Ödnis ist er weit entfernt. Das zeigen nicht zuletzt Bilder wie dieses, welches die ESA-Sonde Mars Express Anfang 2019 aufgenommen hat. Zu sehen ist die Region Chalcoporos Rupes auf der Südhalbkugel des Roten Planeten. Winde haben hier weit ausgedehnte Dünenfelder aufgeweht (rechts). Diese bestehen überwiegend aus alter Vulkanasche, die vor allem am Boden von Einschlagkratern zu Tage tritt. Sie ist deutlich dunkler als der ockerfarbene Staub, der große Teile der Marsoberfläche bedeckt. Verantwortlich für den Farbunterschied ist die Oxidation, bei der das dunkle Eisen in der Vulkanasche mit dem wenigen Sauerstoff in der Marsatmosphäre reagiert und sich dadurch rötlich verfärbt.

Auch die feinen dunklen Linien, die man an vielen Stellen erkennen kann, gehen auf Vulkanmaterial zurück: Hier haben so genannte Staubteufel hellen Staub aufgewirbelt und hunderte Meter breite Schneisen zurückgelassen. Ähnlich wie auf der Erde entstehen die Windhosen, wenn erwärmte Luft beim Aufsteigen in Rotation gerät. Auf dem Mars können sie wegen der höheren Temperaturunterschiede jedoch viel größer werden.

DLR-Pressemitteilung, 2019

ARCHÄOLOGIE
DAS MASSAKER VON KOSZYCE

Im Jahr 2011 gruben Archäologen im südpolnischen Koszyce die Skelette von 15 Menschen aus, darunter vier Mütter mit ihren Kindern. Man hatte ihnen vor etwa 4800 Jahren brutal den Schädel eingeschlagen. Anders als man es von Massengräbern erwarten würde, wurden die Opfer jedoch sehr sorgfältig und mit reichen Beigaben beigesetzt.

Nun hat eine Forschergruppe um Hannes Schroeder von der Universität Kopenhagen durch Erbgutanalysen die Verwandtschaftsverhältnisse der Toten bestimmt. Demnach liegt in Koszyce eine Großfamilie begraben, in der die Männer untereinander verwandt waren und die Frauen überwiegend von außerhalb stammten. Auffällig ist auch, dass Geschwister nebeneinander beerdigt wurden und Kinder dicht an ihre Mütter angeschmiegt. Wer immer das Grab anlegte, habe die Toten also wohl gut gekannt, folgern die Forscher. In Frage kommen hier vor allem die Väter: Von ihnen liegt nur ein einziger im Grab. Als sich das Massaker ereignete, waren viele der Männer also möglicherweise abwesend.

Weiterhin unklar ist, warum die Großfamilie aus Koszyce sterben musste. Immerhin eine Theorie gibt es: Zu der Zeit fanden große kulturelle Umwälzungen statt. Menschen der so genannten Schnurkeramik-Kultur drangen damals immer weiter nach Zentraleuropa vor und verdrängten gewaltsam jene, die ihnen im Weg standen – unter anderem die Mitglieder der Kugelamphoren-Kultur, zu der auch die Opfer von Koszyce gehörten.

PNAS 10.1073/pnas.1820210116, 2019



Die Toten im Massengrab von Koszyce wurden offenbar mit großer Sorgfalt beerdigt: Geschwister liegen hier nebeneinander und Kinder neben ihren Müttern.

PIOTR WODARCZAK

BIOLOGIE
NATÜRLICHER IMPFSTOFF FÜR BIENEN

Honigbienen teilen im Schwarm offenbar einen bisher unbekannten Impfstoff: Ein RNA-Molekül, das im Gelée royale und in der normalen Kost für Arbeiterinnen enthalten ist, schütze den Stock vor Virusinfektionen, berichtet ein Team um Eyal Maori von der University of Cambridge. Die kurzen Erbgutschnipsel enthalten dabei keine Bauanleitung für Proteine, kurbeln aber die Immunabwehr der Insekten an und schützen sie so monatelang vor viralen Erregern.

Hat eine Biene die RNA einmal als Larve mit ihrer Nahrung aufgenommen, gibt sie diese später an andere Schwarmgenossen weiter, berichten Maori und Kollegen: Die RNA-Moleküle wandern durch die Darmwand in die Hämolymphe der Tiere und später, wenn die Bienen ausgewachsen sind, in die Kopfdrüsen. Von dort gelangen sie in den Nahrungsbrei, mit dem Bienen den Nachwuchs füttern. Ein Schwarm kann so über Monate hinweg geschützt bleiben – auch nachdem die erste Generation von geimpften Tieren schon gestorben ist, wie die Experimente des Teams zeigen.

Die Sequenz solcher RNA-Moleküle ähnelt dabei der von Virus-RNA oder dem Erbgut anderer Erreger wie etwa insektenbefallener Pilze. Unklar ist noch, wie die Zellabwehr der Insekten zwischen viraler RNA und den hilfreichen RNA-Schnipseln unterscheidet.

Eine andere Frage können die Forscher dagegen schon beantworten: Offensichtlich bewahren Bienen den fragilen RNA-Impfstoff durch ein weiteres im Gelée royale enthaltenes Molekül. Das Major Royal Jelly Protein-3 (MRJP 3) bindet sich an RNA und formt dabei Kügelchen. Darin sind die RNA-Moleküle weitgehend vor äußeren Einflüssen geschützt – bis sie im nächsten Insektendarm wieder freigesetzt werden.

Cell Reports 10.1016/j.celrep.2019.04.073, 2019

KERNPHYSIK
18 TRILLIARDEN JAHRE HALBWERTSZEIT

Ein internationales Forscherteam hat erstmals einen unvorstellbar seltenen subatomaren Prozess beobachtet. Bei ihm schlucken Atomkerne des Edelgasisotops Xenon-124 zwei Elektronen aus ihrer Schale und wandeln damit zwei Protonen in Neutronen um; aus Xenon-124 wird dadurch Tellur-124. Da der Kern bei der Umwandlung unter anderem zwei Neutrino-Teilchen ausspuckt, sprechen Physiker vom »Zwei-Neutrino-Doppel-Elektroneneinfang«.

Schätzungen zufolge hat dieser Zerfall in ein anderes Element eine Halbwertszeit von 18 Trilliarden Jahren, ein Vielfaches des Alters unseres Universums. Ein einzelner Xenon-124-Atomkern hat sich nach dieser Zeitspanne mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent in Tellur-124 umgewandelt. Betrachtet man sehr viele der Atomkerne auf einmal, steigt die Wahrscheinlichkeit, einer der seltenen Transformationen beizuwohnen.

Die 160 Forscher der XENON-Kollaboration haben genau das getan: Zwischen 2016 und 2018 betrieben sie einen mit drei Tonnen Xenon gefüllten Detektor in einem Labor unter dem Gran Sasso d'Italia. Mit dem akribisch von Umwelteinflüssen abgeschirmten Tank hielten die Wissenschaftler eigentlich nach Teilchen der Dunklen Materie Ausschau, die besonders bereitwillig mit den Atomkernen des Edelgases kollidieren sollten.

Die extrem empfindliche Elektronik des Experiments war jedoch auch für andere Suchen geeignet, etwa die nach dem doppelten Elektroneneinfang bei Xenon-124: Findet er statt, hinterlassen die beiden vom Atomkern verschluckten Ladungsträger eine Lücke in der Atomschale, die nach kurzer Zeit von nach innen rutschenden Elektronen gefüllt wird. Dadurch sendet das betroffene Atom charakteristische Strahlung aus, welche die im Tank installierten Messgeräte nachweisen können. Zwischen Februar 2017 und Februar 2018 haben die Wissenschaftler insgesamt 126 solcher Signale aufgefangen.

Für die Physiker ist das Ergebnis nur ein Zwischenschritt: Sie gehen davon aus, dass sich bei einer anderen Variante der Umwandlung die beiden Neutrinos gegenseitig auslöschen. Das wäre dann der »neutrinolose Doppel-Elektroneneinfang«. Er wäre ein Hinweis auf neue Naturgesetze, die bei der Erklärung des offenkundigen Ungleichgewichts zwischen Materie und Antimaterie im Universum helfen könnten.

Nature 10.1038/s41586-019-1124-4, 2019

XENON COLLABORATION





Der Xenon1T-Detektor war Teil des Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

ASTRONOMIE
2000 JAHRE ALTES HIMMELSRÄTSEL GELÖST

Im Mai des Jahres 48 v. Chr. fiel chinesischen Astronomen ein neuer Punkt im Sternbild Schütze auf, der nach wenigen Tagen wieder verblasste. Was sich hinter diesem »Gaststern« verbarg, blieb lange unklar. Doch nun glaubt eine internationale Arbeitsgruppe um Fabian Göttgens von der Universität Göttingen das Rätsel gelöst zu haben: Mit Hilfe des Very Large Telescope (VLT) in Chile haben die Astronomen das Relikt einer gewaltigen Explosion aufgespürt, deren Licht vor gut 2000 Jahren die Erde erreicht haben müsste.

Der leuchtende Nebel befindet sich im Kugelsternhaufen M22 – eine kompakte Ansammlung von hunderttausenden alten Sternen, die wie ein Satellit um unsere Galaxie kreist. Bei dem Nebel handelt es sich vermutlich um die Überreste einer so genannten Nova, argumentieren die Forscher nach Auswertung des Lichtspektrums. Bei ihr saugt ein weißer Zwergstern Wasserstoff von einem benachbarten Stern ab. Früher oder später erreicht das Material auf der Oberfläche eine kritische Dichte, ab der Atomkerne miteinander fusionieren. Die Folge sind gewaltige Eruptionen, durch die der Weiße Zwerg einige Tage lang enorm viel Strahlung aussendet.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit wurden die chinesischen Astronomen vor 2067 Jahren Zeuge dieses Spektakels, so das Team um Göttgens. Die Position des Nebels stimme zwar nicht exakt mit jener überein, an der 48 v. Chr. der »Gaststern« aufgetaucht sein soll. Allerdings konnte man damals Himmelskoordination auch noch nicht so genau erfassen wie heute, argumentieren die Astrophysiker. Zudem seien in dem fraglichen Ausschnitt des Himmels keine anderen Objekte bekannt, welche die Himmelserscheinung über China erklären könnten.

CHINESE TEXT PROJECT (CTEXT.ORG)

ESA/HUBBLE AND NASA, F. GÖTTGENS (IAG)

Im Kugelsternhaufen M22 haben Astronomen einen leuchtenden Nebel aufgespürt (oben, rot markiert). Er könnte auf eine Sternexplosion zurückgehen, die chinesische Astronomen im Jahr 48 v. Chr. dokumentierten (links).

Astronomy & Astrophysics 10.1051/0004-6361/201935221, 2019

MEDIZIN
UV-EMPFINDLICHES GEL GEGEN INNERE BLUTUNGEN

Bei Notfällen wünschen sich Mediziner wirkungsvolle Pflaster für das Körperinnere, mit denen sie lebensbedrohliche Risse in Arterien oder im Herzen verschließen können. Die Flicken sollten nicht giftig sein, bei hohem Blutdruck dicht halten und idealerweise aus einem biologisch abbaubaren Material bestehen. Ein Team um Hongwei Ouyang von der Zhejiang-Universität in China hat nun ein Pflaster entwickelt, das diesen Anforderungen gerecht werden könnte: Bei Schweinen und Kaninchen seien die Ergebnisse viel versprechend, berichten die Forscher.

Die Erfindung beruht auf einem Gel, das auf Strahlung reagiert. An und für sich ist es dünnflüssig und lässt sich mit Kanülen leicht auftragen. Sobald jedoch UV-Licht das Material trifft, bindet es sich fest an Gewebeoberflächen, auch unter den nassen Bedingungen des Körperinneren.

Möglich macht das die besondere Zusammensetzung: Die Forscher haben den Stoff nach dem Vorbild der extrazellulären Matrix von Bindegewebe entwickelt, in der lose verwobene Proteinfäden und Kohlenhydratketten die Zellen fixieren. Ähnliche Strukturen bildet das Gel bei der Wechselwirkung mit UV-Licht aus. Aktive Aldehydgruppen vernetzen dann Aminosäure- und Zuckerketten fest miteinander und formen so ein stabiles, sehr dichtes Polymer. In den Versuchen hielt es einem Blutdruck von bis zu 290 Millimeter Quecksilbersäule stand – mehr, als im klinischen Notfall beim Menschen meist auftritt. Auch härtete es binnen weniger Sekunden aus, schneller als frühere experimentelle Pflaster.

Letztlich könnte das Gel millimeterlange Risse in der Hauptschlagader oder dem Herzen abdichten, glaubt das Team. Bei Kaninchen gelang es bereits, kleine Leberrisse zu schließen; bei Schweinen dichteten die Wissenschaftler mit dem Pflaster bis zu fünf Millimeter große punktförmige Wunden ab. Die Versuchstiere überlebten die Eingriffe und zeigten auch nach Wochen keine Folgeschäden.

Nature Communications 10.1038/s41467-019-10004-7, 2019

MOBILITÄT
RIDESHARING-DIENSTE KÖNNTEN VERKEHRSCHAOS VERGRÖSSERN

Mitfahr-Angebote wie Uber oder Lyft haben sich in vielen Ländern zu populären Alternativen zu Taxis und anderen Fortbewegungsmitteln entwickelt. Sie gelten auch als Brückentechnologie auf dem Weg zum großflächigen Einsatz von autonomen Autos. Aber bringen die per App buchbaren Fahrer wirklich eine Entlastung für verkehrsgeplagte Städte, wie bisherige Studien zum Teil nahelegten?

Ein Team um Gregory D. Erhardt von der University Kentucky meldet nun große Zweifel an: In San Francisco hätten Uber und Lyft in den Jahren 2010 bis 2016 zu einer deutlichen Zunahme der Stunden geführt, die Autofahrer durch zähflüssigen Verkehr oder Staus verlieren. In der kalifornischen Stadt erfolgte 2016 jede siebte Fahrt mit einem der Dienste.

Das Team hat mit hohem Aufwand die in der Vergangenheit erfolgten Ridesharing-Fahrten rekonstruiert; die Daten hierzu ließen sich auf Umwegen aus den Apps von Uber und Lyft extrahieren. Das Ergebnis verglichen die Mobilitätsforscher mit Simulationen, in denen die Dienste keine Rolle spielten. Die Basis hierfür bildete eine leistungsfähige Software, die mit Hilfe detaillierter demografischer Informationen den Verkehrsfluss zu bestimmten Zeiten berechnet und dabei Uber & Co außen vor lassen kann.

Ohne die Dienste hätte die Zeit, die Autofahrer durch zu viel Verkehr verlieren, zwischen 2010 und 2016 eigentlich nur um 22 Prozent zunehmen dürfen, von insgesamt 65000 auf 79000 vergeudete Stunden, berichten die Wissenschaftler. Tatsächlich wuchs die verlorene Zeit aber um 62 Prozent.

Aus Sicht von Erhardts Team sind verschiedene Ursachen denkbar: So zeigen andere Studien, dass Uber- und Lyft-Autos bis zur Hälfte ihrer Strecken ohne Fahrgast absolvieren, etwa weil sich die Fahrer in Gegenden bewegen, wo sie öfter nachgefragt werden. Auch deuten vergangene Untersuchungen darauf hin, dass rund jede zweite Ridesharing-Fahrt einen Weg zu Fuß, mit dem Fahrrad oder in einem öffentlichen Verkehrsmittel ersetzt – oder ohne die Dienste überhaupt nicht stattgefunden hätte.

Science Advances 10.1126/sciadv.aau2670, 2019

UMWELT
FALLOUT IN TIEFSEEKREBSEN

Die Atombombentests der 1950er und 1960er Jahre bliesen große Mengen radioaktiven Materials in die Atmosphäre. Der meiste Fallout ist heute verschwunden, aber Wissenschaftler können nach wie vor Überreste davon aufspüren. So auch ein Team um Ning Wang von der Chinese Academy of Science: In drei mehr als 6000 Meter tiefen Meeresgräben im Pazifik, darunter der Marianengraben, entdeckten die Meeresbiologen Flohkrebse, in deren Körper sich ungewöhnlich viel Kohlenstoff-14 angesammelt hat.

Flohkrebse der Art *Hirondellea gigas* können selbst in tiefen Meeresgräben überleben. Im Körper der Tiere entdeckten Forscher nun überraschend viel radioaktiven Kohlenstoff.

Das radioaktive Isotop mit einer Halbwertszeit von rund 5700 Jahren kann einerseits auf natürlichem Weg entstehen, durch Kollisionen von Teilchen aus dem Weltall mit Bestandteilen der Erdatmosphäre. Doch auch durch die oberirdischen Atombombentests entstand der Stoff in großen Mengen, denn die in den Explosionen freigesetzten Neutronen reagierten mit Stickstoff zu Kohlenstoff-14.

Schon lange ist klar, dass sich dieses Isotop in den oberen Ozeanschichten ausgebreitet hat. Dort nutzen es Meerestiere für ihren Stoffwechsel. Zur Überraschung der Forscher scheint das mittlerweile auch für sehr tiefe Meeressenken zu gelten: Das Muskelgewebe dort gefangener Flohkrebse enthalte bis zu sechs Prozent mehr radioaktiven Kohlenstoff, als man natürlicherweise erwarten würde, berichtet die Gruppe um Ning Wang. Das seien Werte, die man sonst nur von Organismen an der Meeresoberfläche kenne.

Die Forscher wollten mit ihrer Studie verstehen, wie die Nahrungskette von Flohkrebsen und anderen Lebewesen in der Tiefsee funktioniert. Kohlenstoff-14 gilt hier als wichtiger Signalstoff, da es nur aus der Atmosphäre stammen kann.

Vermutlich werde die Nahrung der Krebstiere an der Oberfläche mit dem Isotop angereichert und sinke von dort rasch in die Tiefe, schreiben die Meeresbiologen. Folglich seien selbst solche schwer zugänglichen Habitate nicht vor den Einflüssen der Menschheit sicher.

Geophysical Research Letters 10.1029/2018GL081514, 2019

MEDIZIN

GENTHERAPIE GEGEN HÖRSCHÄDEN

Nach holprigem Start macht die Gentherapie nun Fortschritte. Forscher wollen sie etwa nutzen, um eine bestimmte Form der Gehörlosigkeit zu behandeln.

REBECCA HALE / NAT. GEOGRAPHIC; MIT FRDL. GEN. VON DINA F. MARON



Dina Fine Maron war früher als Redakteurin bei »Scientific American« tätig und arbeitet jetzt als Reporterin bei »National Geographic«.

spektrum.de/artikel/1647832

ANUSORN NAKDEE / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



SERIE

Gentherapie

Bei einer Gentherapie bringen Mediziner genetisches Material in Körperzellen von Patienten ein, um Krankheiten zu behandeln. Häufig geht es darum, intakte Versionen von Genen einzuschleusen, die der Patient nur in defekter Form besitzt.

Angespannt beobachtet die junge Frau die Mimik und Gestik ihres Gegenübers und nickt oder lächelt, wenn sie glaubt, es könnte passen. Denn obwohl die Lautstärke ihres Hörgeräts erst kürzlich erhöht wurde, versteht sie in Unterhaltungen kaum noch etwas.

Hannah Corderman leidet an einer angeborenen Erkrankung namens Usher-Syndrom, die ihr langsam, aber sicher zwei Hauptsinne raubt. Auf Grund einer genetischen Mutation stellen Zellen ihres Innenohrs sowie ihrer Netzhaut bestimmte Proteine nicht mehr in ausreichender Menge her, die für eine normale Zellfunktion erforderlich sind. Deshalb hat sich, zusätzlich zum Verlust des Gehörs, auch ihre Sehkraft verschlechtert. Bereits als Teenager musste sie Nachtfahrten unterlassen. Heute, mit Mitte 20, erschweren ihr blinde Flecken selbst tagsüber das Sehen. Die Ärzte haben bei ihr das Usher-Syndrom Typ 2A diagnostiziert, eine erbliche Hör- und Sehbeeinträchtigung, die sich über Jahre hinweg allmählich ausprägt. Derzeit kann keine Therapie den Fortschritt der Erkrankung stoppen oder wenigstens verlangsamen. Die junge Frau lebt also mit dem Wissen, dass sie in 10 Jahren – vielleicht auch erst in 20, falls sich die Krankheit langsam entwickelt – taub und blind sein wird.

Es gibt nicht viel, was die Ärzte tun können, um ihr zu helfen. Sie könnten Corderman eines Tages ein Cochlea-Implantat einsetzen, das den Hörnerv direkt stimuliert, gewissermaßen unter Umgehung der Haarsinneszellen im Innenohr. Das würde auch dann noch eine gewisse Tonwahrnehmung ermöglichen, wenn die besten Hörgeräte hierfür nicht mehr ausreichen. Dem Funktionsverlust der Netzhaut wiederum ließe sich mit Retina-Implantaten entgegenwirken, welche die lichtempfindlichen Zellen elektrisch stimulieren. Doch werden sie selten eingesetzt, da sie dem tatsächlichen Sehempfinden nicht wirklich nahekommen.

Obwohl Corderman keine emsige Leserin wissenschaftlicher Zeitschriften ist, weiß sie, dass unweit ihres Wohnorts in einigen Bostoner Laboren mehrere hundert Mäuse gehalten werden, die eine ähnliche Hörstörung haben wie sie. Doch den Nagern geht es, im Gegensatz zu ihr, zunehmend besser. Denn Biologen haben mittels Gentherapie zusätzliche Erbanlagen in die Tiere eingeschleust, welche die korrekte Bauanleitung für jene Proteine tragen, an denen es erkrankten Individuen mangelt. 2017 berichteten die Biologin Gwenaëlle Géléoc vom Boston Children's Hospital und ihre Kollegen von einer »beispiellosen Genesung« solcher Mäuse, denen die Wissenschaftler entsprechende DNA-Stücke ins Innenohr gespritzt hatten. Die Behandlung stellte das Hörvermögen der Tiere nahezu vollständig wieder her. Etwa zeitgleich teilte ein Forscherteam von der Harvard Medical School mit, es habe eine ähnliche Gentherapie getestet, allerdings an Mäusen mit einem anderen angeborenen Gendefekt – und zunächst eine leichte Verbesserung des Hörvermögens erzielt. Eine dritte im Bostoner Raum arbeitende Gruppe nutzte kürzlich Methoden des Genome Editing, um ein mutiertes Gen in »Beethoven-Mäusen« auszuschalten (die Tiere sind nach dem Komponisten benannt, der in seinen späteren Jahren ertaubte). All diese Fortschritte geben Anlass zu der Hoffnung, dass genetisch bedingte Hörstörungen – in den USA mit die häufigsten angeborenen Komplikationen – erstmals ursächlich behandelt werden können.

Dabei hat die Gentherapie einige schwierige Jahre hinter sich. 1999 verstarb auf Grund eines tragischen Behandlungsfehlers ein 18-jähriger Patient namens Jesse Gelsinger, der an einem angeborenen Enzymdefekt litt. Wissenschaftler der University of Pennsylvania hatten ihm in einem frühen Versuch, die Gentherapie anzuwenden, Adenoviren mit therapeutischen Genen injiziert. Allerdings waren die Partikel viel zu hoch dosiert. Kurz nach dem Eingriff verschlechterte sich Gelsingers Zustand, die Reaktion seines Immunsystems geriet außer Kontrolle und richtete sich gegen den eigenen Organismus. Der Patient starb an einem Multiorganversagen. Diese Tragödie rückte die Gentherapie in ein sehr schlechtes Licht; Fördermittelgeber zogen ihre Unterstützung zurück, und viele Forscher gingen auf Abstand.

Hannah Corderman leidet am Usher-Syndrom, einer angeborenen Erkrankung, bei der die Betroffenen allmählich ertauben und erblinden.

ETHAN HILL (ETHANHILL.COM)



Manche jedoch setzten ihre gentherapeutischen Arbeiten im Stillen fort, wobei sie sich zunächst auf Zell- und Tierversuche konzentrierten – in der Hoffnung, Behandlungsansätze für solch komplexe Erkrankungen wie Osteoarthritis, Krebs oder auch Diabetes Typ 1 entwickeln zu können. Zur Sicherheit reduzierten sie die Dosis der als Genfähren dienenden Viren, um eine überschießende Reaktion des Immunsystems zu vermeiden. Zudem wendeten sie sich von dem Virustyp ab, der bei Gelsinger benutzt worden war, und experimentierten stattdessen mit anderen Arten infektiöser Partikel. Dabei zeichnete sich eine viel versprechende Alternative zu Adenoviren ab, nämlich so genannte Adeno-assoziierte Viren (AAV), die als Genfähren keine Immunkomplikationen auszulösen scheinen, da sie menschliche Zellen nicht schädigen (siehe auch **Spektrum** März 2019, S. 36). Zudem gelang es besser, die Wirkung der viralen Gentransporter auf bestimmte Zellen zu begrenzen. »Es geht darum, die richtigen Genfähren für die richtige Krankheit und die richtigen Zielzellen zu finden, sie richtig zu dosieren und zu verstehen, wo im Körper sie ihre Wirkung entfalten«, sagt Cynthia E. Dunbar, die an den National Institutes of Health (NIH) forscht und bis vor Kurzem Präsidentin der American Society of Gene & Cell Therapy war.

Das Interesse an Gentherapie wächst massiv

Die Bemühungen trugen Früchte: Die amerikanische Arzneimittelbehörde FDA hat die ersten Gentherapieverfahren für die Anwendung am Menschen zugelassen. Im August 2017 gab sie grünes Licht für Kymriah, ein gentechnisches Verfahren zur Behandlung der akuten lymphatischen Leukämie, und im selben Jahr genehmigte sie die erste Gentherapie für eine seltene Form angeborener Blindheit. Pharmaunternehmen und Risikokapitalgeber pumpen nun viel Geld in dieses Forschungsgebiet, wie Dunbar berichtet. An der Jahrestagung der American Society of Gene & Cell Therapy hätten 2018 etwa 3400 Personen teilgenommen; fünf Jahre zuvor waren es lediglich 1200 gewesen.

Das neu erweckte Interesse an der Gentherapie wendet sich auch der Behandlung von vererbten Hörstörungen zu. Viele meinen, zunehmende Taubheit habe vor allem mit dem Älterwerden oder mit Unfällen zu tun, doch gehören Hörschäden zu den häufigsten Geburtsdefekten beim Menschen; sie betreffen etwa 3 von 1000 Neugeborenen. Genveränderungen zeichnen für mehr als die Hälfte davon verantwortlich – einschließlich des Usher-Syndroms. Diese Krankheit bietet sich als Ziel für Gentherapien besonders an, da die Patienten Mutationen in einzelnen Genen tragen, deren funktionaler Ersatz die Krankheitsursache und damit auch die Symptome beheben sollte. Bestimmte Typen der Erkrankung – etwa jener, unter dem Corderman leidet –, schreiten relativ langsam fort, was ein Zeitfenster nach der Diagnose eröffnet, in dem sich die genetisch bedingte Schädigung stoppen lässt. Der zunehmende Funktionsverlust betrifft unter anderem die Haarsinneszellen im Innenohr, die normalerweise von außen eintreffende Schallwellen in Nervensignale umwandeln, welche sie ans Gehirn weiterleiten. Bei Corderman und anderen vom Usher-Syndrom Betroffenen sorgen defekte Gene dafür, dass die Haarsinneszellen nicht mehr richtig funktionieren.

AUF EINEN BLICK
DIE TAUBHEIT ÜBERWINDEN

1 Hörschäden gehören zu den häufigsten Geburtsdefekten beim Menschen. In vielen Fällen haben sie genetische Ursachen.

2 Die Gentherapie hat ihre Startprobleme überwunden und verzeichnet auf einigen Bereichen erste Erfolge. Sie könnte helfen, erbliche Formen der Schwerhörigkeit wie das Usher-Syndrom zu behandeln.

3 Mittels veränderter Viren mit therapeutischen Genen ist es bereits gelungen, Mäuse von angeborener Schwerhörigkeit zu heilen. Jetzt gilt es, die Methode auf menschliche Patienten zu übertragen.

Jene Zellen gentherapeutisch zu behandeln, bietet die Chance, die Krankheit an der Wurzel zu bekämpfen, statt mit Hightech-Hörgeräten die Symptome zu lindern. Die jüngst in Tierversuchen erzielten Erfolge seien »sehr beeindruckende und viel versprechende erste Schritte«, wie Theodore Friedmann meint, ein Kinderarzt und Gentherapie-Forschungskoordinator an der University of California, San Diego, der an diesen Arbeiten nicht beteiligt war. Nun müsse das Verfahren aber noch erfolgreich auf den Menschen übertragen werden.

Wie ein solcher Tierversuch abläuft, konnte ich 2016 in einem Labor der Harvard University beobachten. Ich schaute dort Bence Gyorgy über die Schulter, der in der Abteilung für Neurobiologie mit Mäusen experimentierte, die mit schadhaften Haarsinneszellen gezüchtet wurden; ihre Gene wiesen ähnliche Defekte auf wie die von Usher-Syndrom-Patienten. Gyorgy beugte sich über ein solches Tier, das narkotisiert worden war, und machte einen winzigen Einschnitt hinter dessen Ohr. Von da aus schob er eine feine Kanüle durch verschiedene Gewebeschichten bis zu einem winzigen Bereich im Mittelohr, der als Rundfenster-

Das Usher-Syndrom bietet sich besonders gut für eine Gentherapie an, da ihm Mutationen in einzelnen Genen zu Grunde liegen

membran bezeichnet wird und einen Zugang zum Innenohr ermöglicht. Dort hinein injizierte der Forscher eine blassrosa Lösung mit etwa 200 Milliarden AAV-Partikeln. Alle davon enthielten eine intakte Form jenes Gens, das in der Maus mutiert vorlag und ihren Hörschaden verursachte.

Der Eingriff führte dazu, dass die AAV die Haarsinneszellen im Innenohr infizierten und dabei ihre Genfracht in diese einschleusten. Wie die Wissenschaftler mittlerweile wissen, können sie nicht jeden AAV-Typ hierfür einsetzen. Manche Viren bringen ihre Genfracht nur in die inneren Haarsinneszellen ein, die mit Nervenzellen kommunizieren – aber nicht ausreichend in die äußeren Haarsinneszellen, die das einlaufende Schallsignal zunächst verstärken. Um das Hörvermögen möglichst vollständig wiederherzustellen, muss die Genfähre beide Zelltypen infizieren, betont der Neurobiologe David Corey von der Harvard University, ein Kollege Gyorgys, der ebenfalls entsprechende Versuche an Mäusen durchgeführt hat.

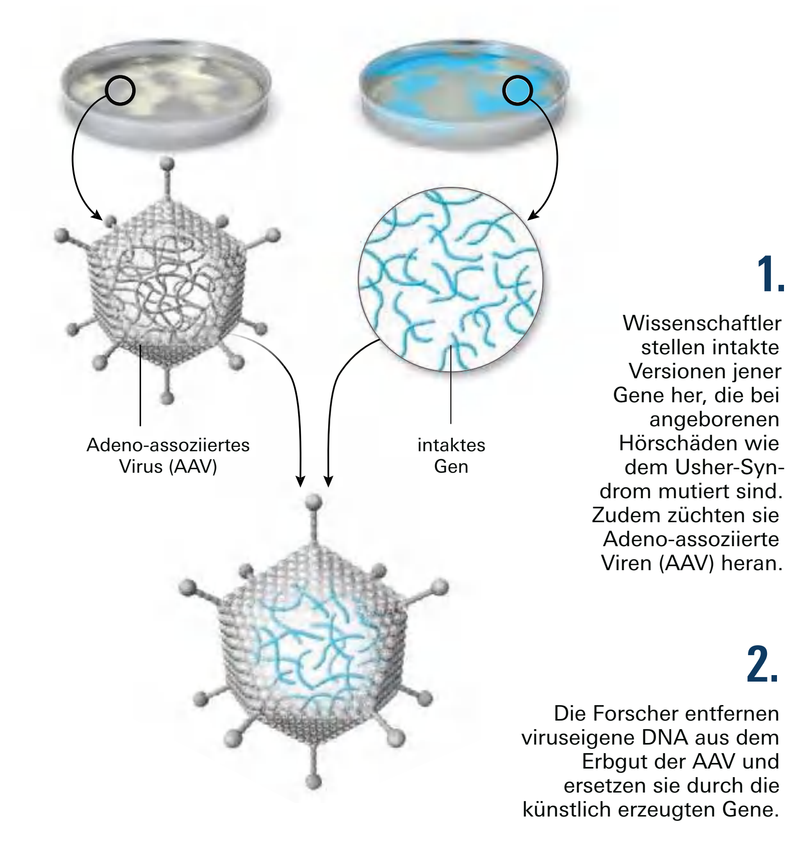
Mittels Versuch und Irrtum sowie gezielten Umstrukturierungen des viralen Genoms isolierten die Forscher einige AAV-Typen, die beide Haarsinneszellsorten im Innenohr als Ziel erkennen. Die Wissenschaftler veränderten bestimmte Proteine der äußeren Virushülle und erhielten so Moleküle, die an die Oberfläche beider Zelltypen andocken und dem Virus somit das Eindringen in sie ermöglichen. Gwenaëlle Géléoc und ihre Mitarbeiter berichteten 2017 in einem Fachartikel, ein entsprechend modifizierter AAV-Typ in Mäusen mit angeborener Taubheit habe funktionstüchtige Haarsinneszellen hervorgebracht. Andere Forschergruppen teilten mit, sie hätten AAV in die inneren Haarsinneszellen von älteren Labormäusen eingebracht, deren Ohren mehr denen von kleinen Kindern ähneln.

Verdächtige Gene

Das war aber nur eine Teilstrecke auf dem Weg dahin, Hörschäden erfolgreich zu behandeln. Hinzukommen musste noch, jene Mutationen zu finden, die zur Ausprägung defekter Haarsinneszellen führen. Schon in den 1990er Jahren hatten Wissenschaftler damit begonnen, indem sie Familien identifizierten, in denen die typischen Hör- und Sehstörungen des Usher-Syndroms auftraten, und deren Genome miteinander verglichen. Dabei fielen mehrere Gene auf, die an der Entwicklung sowohl der Ohren als auch der Augen beteiligt zu sein schienen und als mögliche Orte krank machender Mutationen besonders verdächtig waren. Forscher züchteten daraufhin Mäuse mit oder ohne Mutationen in den entsprechenden Erbanlagen und beobachteten, welche Tiere die Krankheitssymptome aufwiesen. Es zeigte sich, dass Modifikationen des Gens *USH2A* hinter dem allmählich fortschreitenden Erkrankungstyp stecken, an dem Corderman leidet; die nichtmutierte Version dieser Erbanlage bringt gesunde Haarsinneszellen hervor. An dem

Wiederherstellung des Hörsinns

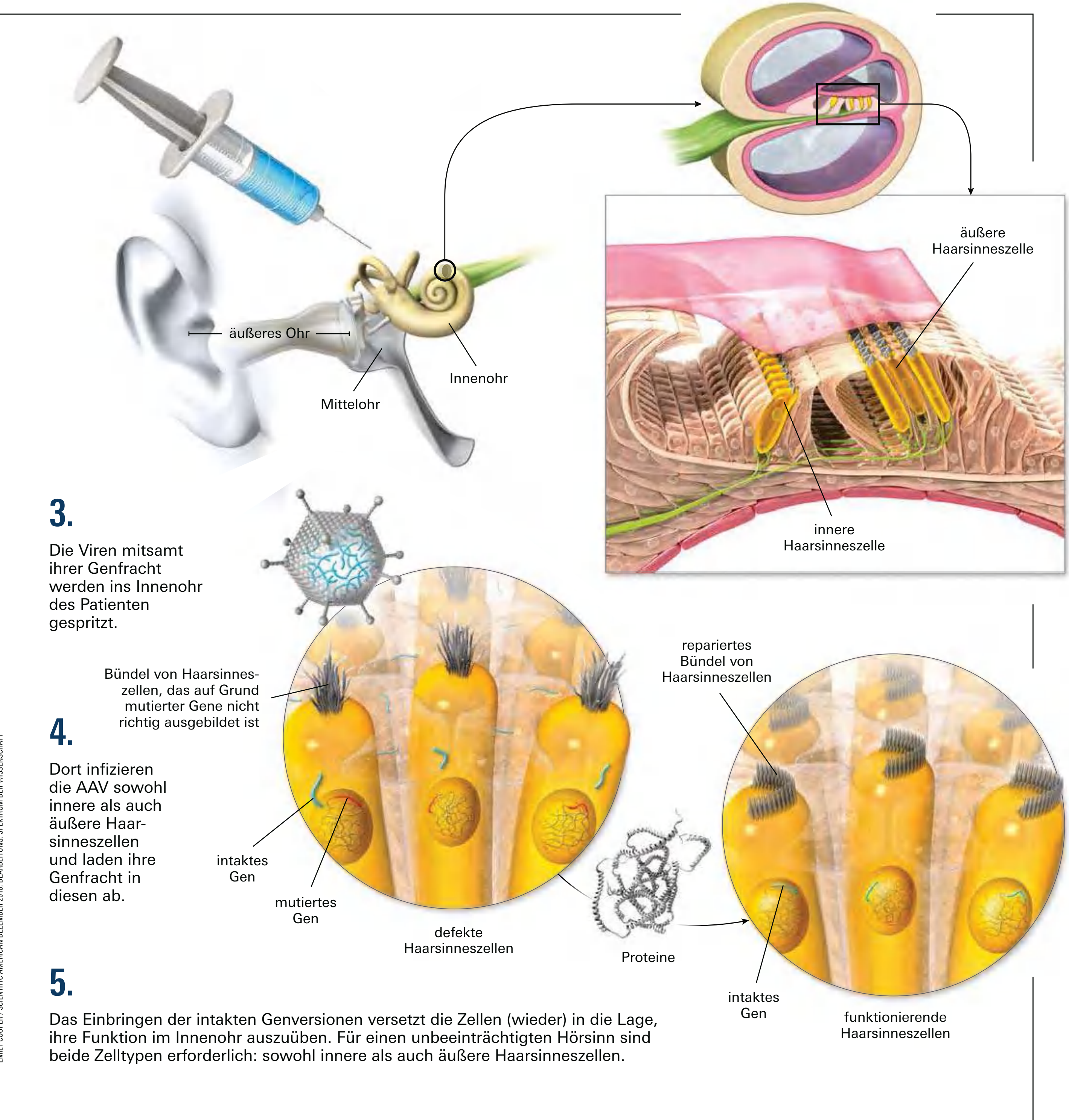
Akustische Signale laufen über das äußere Ohr und das Mittelohr ins Innenohr ein, wo Haarsinneszellen sie in Nervensignale umwandeln und ans Gehirn weiterleiten. Sind bestimmte Gene in diesen Zellen mutiert, bringen sie defekte Proteine hervor, was zu einem Funktionsverlust der Zellen und somit zu Hörschäden führt. Forscher haben nun einen gentherapeutischen Ansatz entwickelt, um die mutierten Gene durch intakte zu ersetzen. Sie bringen die korrekten Erbanlagen in veränderte Adeno-assoziierte Viren (AAV) ein und spritzen diese dann ins Innenohr. Dort befallen die infektiösen Partikel die Haarsinneszellen und laden ihre genetische Fracht darin ab. Das führte in Versuchen mit Mäusen dazu, dass taube Tiere ihr Hörvermögen wiedererlangten. Falls das auch beim Menschen funktionieren sollte, ließen sich damit folgenreiche Geburtsdefekte wohl an der genetischen Wurzel packen.



EMILY COOPER / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

schwersten und sich am schnellsten ausprägenden Usher-Syndrom vom Typ 1 sind Mutationen in fünf verschiedenen Genen beteiligt, darunter der Erbanlage *USH1C*, die für das Protein Harmonin codiert.

In den zurückliegenden Jahren hat das Team um Gwenaëlle Géléoc all diese Puzzleteile zusammengefügt. Sie und ihr Ehemann, der HNO-Arzt Jeffrey Holt, produzierten zusammen mit weiteren Forschern eine AAV-Variante mit maßgeschneiderter Virushülle. Sie entfernten mehrere Erbanlagen aus dem Genom des Virus, die mit seinem Fortpflanzungszyklus zu tun haben, und ersetzten sie durch intakte Versionen des Gens *USH1C*. Zudem führten sie einen so genannten Promotor ein – eine DNA-Sequenz, die dafür sorgt, dass *USH1C* in den Haarsinneszellen abgelesen wird. Als die Forscher das Genkonstrukt mit Hilfe des Virus in die Zellen eingeschleusten, produzierten diese in großer Menge intakte Harmoninmoleküle, so dass sie ihre normalen Zellfunktionen wieder ausüben konnten. Die Haarsin-



EMILY COOPER / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



ETHAN HILL (ETHANHILL.COM)

Gwenaëlle Géléoc und Jeffrey Holt forschen am Boston Children's Hospital. Sie verabreichen Mäusen mit angeborenen Innenohrschäden speziell veränderte Viren, deren Erbgut ein therapeutisches Gen enthält. Die Behandlung gibt den Tieren ihr Hörvermögen und ihren Gleichgewichts- sowie Orientierungssinn zurück.

neszellen stellten zwar weiterhin auch defekte Harmoninvarianten her, da ihr Genom ja nach wie vor das mutierte *USH1C* enthielt, dies schadete aber nicht.

Auf Basis dieser Methode haben die Forscher am Boston Children's Hospital dann Mäuse behandelt, die unter Hörschäden ähnlich jenen der menschlichen Usher-Syndrom-Patienten litten. Sie brachten die modifizierten Viren mit einem chirurgischen Eingriff, wie ich ihn bei Gyorgy beobachtet hatte, in die Tiere ein. In den ersten beiden Wochen infizierten die Viren nur einige wenige Haarsinneszellen im Innenohr der Nager; doch nach sechs Wochen hatten sie rund 80 Prozent von diesen befallen. Das Wichtigste jedoch war, dass die so behandelten Mäuse wieder auf Geräusche reagierten. Wurden sie einem plötzlichen Alarmton ausgesetzt, flüchteten viele, die es zuvor nicht getan hatten – die einst tauben Nager konnten wieder hören. Haarsinneszellen üben freilich noch eine weitere wichtige Funktion im Körper aus: Sie reagieren auf Drehbewegungen sowie auf horizontale oder vertikale Beschleunigungen des Körpers und wirken entscheidend am Gleichgewichts- und Orientierungssinn mit. Mäuse mit geschädigten Haarsinneszellen, wie sie bei verschiedenen Formen des Usher-Syndroms auftreten, zeigen oft Bewegungsstörungen und tun sich schwer damit, ihre Position im Raum zu erkennen. Statt im Käfig herumzuschnüffeln, kauern sie sich in eine Ecke. Und im Gegensatz zu ihren gesunden Artgenossen, die geborene Schwimmer sind, paddeln sie im Wasser panisch umher und versuchen festzustellen, wo »oben« ist. (Die Forscher nehmen die Tiere rechtzeitig heraus, bevor diese unter zu großen Stress geraten.) Wenn die Gentherapie tatsächlich die Funktion der Haarsinneszellen wiederherstellt, sollten damit auch jene Symptome verschwinden.

Als ich direkt nach meinem Besuch an der Harvard University das Labor von Géléoc und Holt aufsuchte, sah ich mit Gentherapie behandelte Mäuse, die sich erstaunlich normal verhielten. Tiere, die dem Eingriff zwei Monate zuvor unterzogen worden waren, legten im Wasser praktisch dasselbe Verhalten an den Tag wie ihre gesunden Artgenossen und standen diesen selbst hinsichtlich des Orientierungssinns in nichts nach. Es war verblüffend, wie wenig sich die beiden Gruppen voneinander unterschieden.

Trotz all dieser Erfolge bleiben noch große Schwierigkeiten zu lösen, bis es möglich sein wird, auch menschliche Usher-Patienten mit maßgeschneiderten AAV zu behandeln. Eines der Probleme lautet, dass die derzeit verwende-

Die mit Gentherapie behandelten Mäuse legten quasi dasselbe Verhalten an den Tag wie ihre gesunden Artgenossen

ten Viren zu klein sind. Ihre Größe genügt zwar, um Gene zur Korrektur des Usher-Syndroms Typ 1C einzubringen; an dieser Variante litten die Mäuse, die in den Studien so gut auf die Gentherapie ansprachen. Aber bei vielen anderen Untertypen des Usher-Syndroms wirken weit größere Gene am Krankheitsgeschehen mit. An Cordermans Erkrankungsform beispielsweise ist eine Erbanlage beteiligt, für die in dem kleinen Genom der AAV schlicht zu wenig Platz ist.

Zerlegt und wieder zusammengefügt

Eine mögliche Lösung wäre, umfangreiche Gene in mehrere Stücke zu zerschneiden, die dann mittels verschiedener Genfähren verabreicht würden. Jedes dieser Stücke müsste Enden aufweisen, die sich ganz spezifisch nur mit bestimmten anderen Enden zusammenlagern, so dass die verschiedenen Genfragmente am Zielort zum gewünschten Konstrukt zusammenkämen. Die defekte Erbanlage bei Cordermans Usher-Typ etwa ist so lang, dass sie in drei Teile zerschnitten werden müsste. Damit die Gentherapie zum Erfolg führt, müssten die drei viralen Genfähren mit jeweils einem dieser Abschnitte allesamt in die Haarsinneszellen des Innenohrs gelangen und ihre Fracht darin abladen, so dass die Genfragmente dort zueinanderfinden und sich korrekt verbinden. Die hochspezifische Paarung der Nukleinbasen ermöglicht dies zwar – normalerweise lagern sich nur DNA-Stränge mit komplementärer Basensequenz zusammen –, doch die Methode ist kompliziert und damit störanfällig.

Eine weitere Option lautet, größere Viren zu verwenden, die nicht zu den AAV gehören, und diese so zu verändern, dass sie keine umfassende Immunreaktion provozieren. Man könnte auch komplett auf Viren verzichten und stattdessen versuchen, das Genmaterial mit Hilfe von Nanopartikeln einzubringen, also mit winzigen künstlichen Körnchen, die Zellmembranen durchdringen können. Mehrere Forscher, darunter Géléoc und Holt, untersuchen zudem, ob sich das schadhafte Gen mittels der Genome-Editing-Methode CRISPR-Cas entfernen und durch eine korrigierte Version seiner selbst ersetzen lässt. Das Usher-Syndrom ist eine rezessiv vererbte Erkrankung, die sich nur dann ausprägt, wenn beide Kopien des Gens (die von der Mutter und die vom Vater geerbte) defekt sind. Falls es gelingt, eine davon herauszuschneiden und gegen eine intakte auszutauschen, sollte das den weiteren Fortschritt der Erkrankung verhindern.

Bislang ist das leider noch niemandem geglückt; die CRISPR-Cas-Technik scheint sich eher zum Herausschneiden von DNA-Abschnitten als zu ihrem Einbau zu eignen. Aus diesem Grund beschränkt sich die Anwendung des Genome-Editing-Verfahrens derzeit auf Mäuse mit einer seltenen Form des Hörschadens, bei dem lediglich eine Genkopie defekt ist statt beider. Wenn die problematische Kopie ausgeschaltet wird, kann die verbleibende gesunde ihre Arbeit fortsetzen und für eine korrekte Zellfunktion sorgen – ein Ansatz, der bei den Beethoven-Mäusen gut funktioniert. Allerdings ist mittlerweile bekannt, dass CRISPR-Cas unerwünschte DNA-Veränderungen herbeiführen kann. Momentan hält so gut wie niemand die Methode für ausgereift genug, um am Menschen eingesetzt zu werden. Noch scheint es in der Gentherapie keine wirkliche Alternative zu viralen Fähren zu geben.

Doch egal, welches Vehikel die therapeutischen Gene am Ende in den Organismus transportiert: Es wird wenig helfen, solange sich die Diagnose erblicher Hörschäden bei Kleinkindern nicht deutlich verbessert – denn die Betroffenen profitieren am meisten von frühen Interventionen. In den USA werden zwar die meisten Neugeborenen auf ihre Hörfunktionen hin untersucht, aber die Ärzte stellen dabei selten eine spezifische Erkrankung fest, geschweige denn deren genetische Ursache. Das trifft auch auf Corderman zu: Erst in ihrer Highschool-Zeit kam heraus, an welcher Erbkrankheit sie leidet. Das muss sich ändern, damit die betroffenen Kinder rechtzeitig behandelt werden können.

Hannah Corderman wartet nicht darauf, dass das rasant wachsende Interesse an der Gentherapie in Form von Behandlungsverfahren bei ihr ankommt. Sie hat ihre Ausbildung abgeschlossen, arbeitet in der Marketing-Abteilung des Bauunternehmens ihrer Familie und ist entschlossen, ihr Leben in vollen Zügen zu genießen, solange dies noch möglich ist. So hat sie mehrere Reisen zu den Polarlichtern gebucht: »Seit mir bewusst ist, dass ich nicht mehr sehr viel Zeit hierfür habe, hat sich meine Einstellung zum Leben komplett verändert.« Corderman engagiert sich für andere Patienten und ermutigt diese dazu, ihr Leben in die Hand zu nehmen und sich von der Krankheit nicht ausbremsen zu lassen. Der Verlust des Gehörs bedeutet für sie nicht, sich in die Stille zurückzuziehen. ◂

QUELLEN

György, B. et al.: Rescue of hearing by gene delivery to inner-ear hair cells using exosome-associated AAV. Molecular Therapy 25, 2017

Pan, B. et al.: Gene therapy restores auditory and vestibular function in a mouse model of Usher syndrome type 1c. Nature Biotechnology 35, 2017

Suzuki, J.: Cochlear gene therapy with ancestral AAV in adult mice: complete transduction of inner hair cells without cochlear dysfunction. Scientific Reports 7, 2017

GENTHERAPIE
BESSERE VERPACKUNG FÜR DNA-PAKETE

Künstlich veränderte Viren sollen helfen, Genmaterial in bestimmte Körperzellen einzuschleusen, um so Erbkrankheiten zu behandeln.



Neil Savage ist Wissenschafts- und Technologiejournalist. Er lebt in Lowell, Massachusetts.

spektrum.de/artikel/1647834

Luk Vandenberghe geht zu einem Regal hinüber und greift nach zwei faustgroßen Objekten. Eines davon ist ein Ikosaeder, das aussieht wie ein besonders komplizierter magischer Würfel mit 20 Flächen statt der üblichen sechs. Bei dem anderen Objekt handelt es sich um eine cremefarbene Knolle aus Hartplastik, hergestellt von einem 3-D-Drucker, deren Oberfläche übersät ist mit Beulen, Vertiefungen und insgesamt 20 Dreiergruppen pyramidenähnlicher Gebilde. Beide Objekte stellen Modelle eines Adeno-assoziierten Virus (AAV) dar. Diese infektiösen Partikel lassen sich als Genfähren einsetzen, um Erbanlagen in Körperzellen einzuschleusen.

AUF EINEN BLICK
AUF DIE HÜLLE KOMMT ES AN

1 In der Gentherapie dienen häufig Adeno-assoziierte Viren (AAV) dazu, genetisches Material gezielt in Zellen einzuschleusen.

2 Forscher verändern die Proteinhüllen der Viren, um diesen Vorgang effizienter zu machen, und optimieren so die Genfähre.

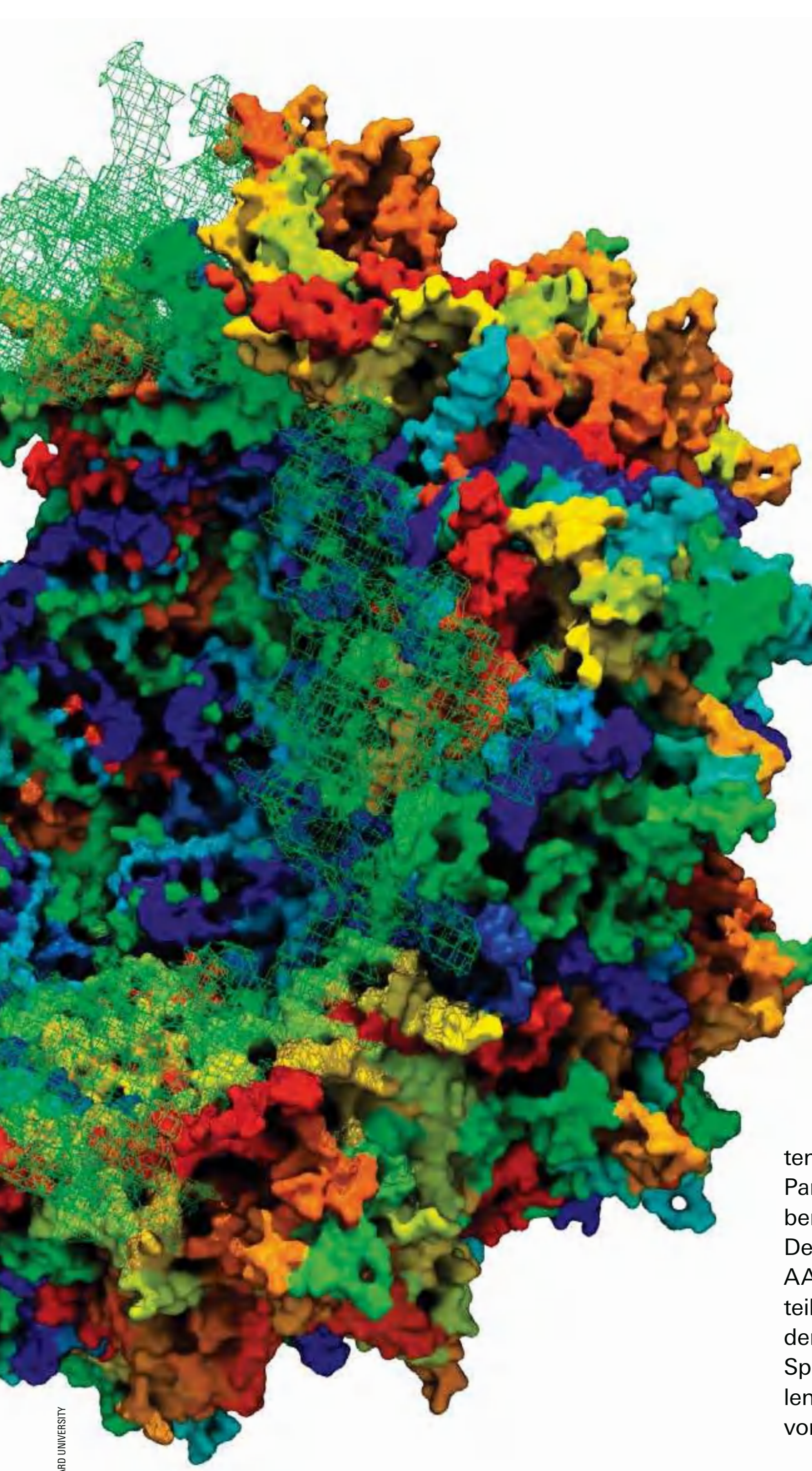
3 Solche abgewandelten AAV scheinen gut geeignet zu sein, um Gendefekte zu behandeln, die zu Taub- und Blindheit führen. Eine neu gegründete Firma soll helfen, entsprechende Therapien auf den Markt zu bringen.

Vandenberghe ist Bioingenieur und leitet das Grousbeck Gene Therapy Center am »Massachusetts Eye and Ear«-Krankenhaus in Boston. Er untersucht, wie die winzigen Strukturen auf der Oberfläche der Viren deren biologisches Verhalten prägen, und möchte die Partikel gezielt verändern, um sie zu besseren Genfähren zu machen – jedoch ohne ihre Ikosaederstruktur (oder, in der Analogie, das Farbmuster des magischen Würfels) allzu sehr abzuwandeln. Vandenberghe promovierte 2007 an der Katholischen Universität Löwen in Belgien über die Struktur der AAV-Viruspartikel und wurde später an der Harvard University in Cambridge, Massachusetts, zum außerordentlichen Professor berufen. Mittels Computermodellen und experimenteller DNA-Synthese versucht er, die Anwendung von AAV in der Gentherapie zu optimieren.

ERIC ZINN / VANDENBERGHE LAB, HARVARD UNIVERSITY

Infizieren, ohne krank zu machen

Natürlich vorkommende AAV sind die Arbeitstiere der modernen Gentherapie. Sie infizieren menschliche Zellen, ohne diese krank zu machen, und existieren in zahlreichen Varianten, die jeweils unterschiedliche Zelltypen befallen. Um modifizierte Erbanlagen in bestimmte Körperzellen zu bringen, ist es sehr wichtig, den passenden Virustyp zu verwenden. Bisher haben Vandenberghe und seine Kolle-



ERIC ZINN / VANDENBERGHE LAB, HARVARD UNIVERSITY

Modellhafte Darstellung der Hülle eines Adeno-assoziierten Virus (AAV). Forscher haben 75 AAV-Varianten miteinander verglichen und daraus rekonstruiert, aus welchen gemeinsamen Vorfahren diese entstanden sind. Der älteste der hypothetischen Ahnen erwies sich als außerordentlich leistungsfähige Genfähre.

gen mehr als 140 natürlich vorkommende Varianten des Virus gefunden. Nun möchten sie die infektiösen Partikel subtil abändern, so dass diese das jeweilige Zielgewebe im Organismus effektiver erreichen und dort möglichst selektiv nur die gewünschten Zellen infizieren.

In den zurückliegenden beiden Jahrzehnten lautete das vordringliche Ziel der AAV-Forschung, Behandlungsmethoden zu entwickeln, die eine niedrige Dosierung der Viren erlauben und ausschließlich im jeweiligen Zielgewebe wirken. Auch ein anderes grundlegendes Problem versuchten die Wissenschaftler zu lösen. Da es sich um infektiöse Partikel handelt, die in der natürlichen Umwelt auftreten, haben viele Menschen eine Immunität dagegen entwickelt. Deshalb sind Therapieverfahren, die auf dem Einsatz von AAV basieren, bei etlichen Patienten zum Scheitern verurteilt. Schätzungen zufolge sind zwischen 20 und 90 Prozent der Menschen gegen solche Viren immun. Die große Spannbreite dieser Angabe resultiert zum Teil aus regionalen Besonderheiten; so kommen AAV in Afrika viel häufiger vor als in den USA.

Bioingenieure sind überzeugt davon, dass sich die Eigenschaften der AAV optimieren lassen, indem man deren Proteinhülle (das so genannte Kapsid) verändert. Denn Unterschiede in der Kapsidstruktur führen unter anderem dazu, dass einige natürlich auftretende Virusvarianten menschliche Leberzellen bis zu 100-mal effizienter infizieren als andere. »Leider wissen wir noch nicht genau, welche Merkmale der Hülle diese starke Spezifität bedingen«, sagt Vandenberghe. Ebenso ist noch zu wenig darüber bekannt, wie eine Abänderung in einem Teil des Kapsids dessen Struktur in einem anderen Teil beeinflusst – um in der Analogie zu bleiben: wie das Wegdrehen bestimmter Farbflächen auf der Vorderseite des magischen Würfels auch

auf dessen Rückwand neue Farbflächen erscheinen lässt. »Solche Probleme zu lösen, ist schon bei einem handelsüblichen magischen Würfel nicht trivial«, sagt Vandenberghe, »und erst recht nicht bei einem mikroskopisch kleinen Ikosaeder.«

Um mehr darüber zu erfahren, wie Struktur und Funktion des Viruskapsids miteinander zusammenhängen, beschlossen der Forscher und sein Team, die Evolution der AAV zu rekonstruieren. Im Jahr 2015 speisten sie die Aminosäuresequenzen der Proteine von 75 AAV-Varianten, die aus menschlichen und tierischen Körpergeweben isoliert worden waren, in ein Computerprogramm ein, das Evolutionsprozesse simuliert. Der Algorithmus errechnete daraus die Sequenzen von neun möglichen Vorfahren der heutigen AAV. Den ältesten dieser hypothetischen Ahnen bezeichneten die Forscher als Anc80. Vandenberghe betont, dass die tatsächlichen Vorläufer der heutigen Viren möglicherweise anders aussahen als von der Simulation vorgeschlagen. Doch darum gehe es gar nicht. »Wichtig war nur, dass unser Ansatz mögliche Wege aufzeigte, wie wir die Kapsidstruktur variieren konnten.«

Künstlich erzeugte Viren lassen kaum eine Haarsinneszelle aus

Das Team stellte die errechneten Vorläuferviren anschließend tatsächlich her und experimentierte mit ihnen. Dabei erwies sich Anc80 als besonders interessant. Als die Forscher dieses Virus auf Mäuse übertrugen, infizierte es sämtliche inneren und fast alle äußeren Haarsinneszellen des Innenohrs, was zuvor bei keinem anderen AAV beobachtet worden war. Im Jahr 2017 setzten Vandenberghe und seine Kollegen das Anc80-Virus ein, um bei Labormäusen einen angeborenen Gendefekt zu behandeln, der bei menschlichen Patienten zum Usher-Syndrom mit Taub- und Blindheit führt (siehe »Gentherapie gegen Hörschäden« ab S. 12). Die Forscher waren von den Möglichkeiten ihrer neuen Genfähre begeistert und gründeten in Boston das Unternehmen Akouos, um Therapien für Menschen mit genetisch bedingtem Hörverlust zu entwickeln.

Verschiedene weitere Firmen setzen Anc80 ebenfalls als Genfähre ein und entwickeln Behandlungsmethoden damit, darunter Selecta Biosciences in Watertown (Massachusetts), Vivet Therapeutics in Paris und Lonza in Basel. Schon 2011, noch vor den Arbeiten mit Anc80, hatte Vandenberghe in Paris die Firma GenSight Biologics mit gegründet, um Therapien für seltene erbliche Netzhauterkrankungen zu entwickeln. Zurzeit betreibt GenSight Biologics klinische Studien mit zwei einschlägigen Arzneistoffen.

Bessere Genfähren zu entwickeln, sei der Schlüssel dazu, die Gentherapie voranzutreiben. Das betont Eric Kelsic, Systembiologe an der Harvard University. Kelsic sucht nach Wegen, Kapside von Viren gezielt zu verändern und an bestimmte Anforderungen anzupassen. In Computersimulationen tauscht er systematisch jede Aminosäure in der Proteinsequenz eines AAV gegen jede einzelne der übrigen 19 Aminosäuren aus, die als Proteinbausteine dienen – und beobachtet jeweils, wie sich das auf die Kapsidstruktur auswirkt. »Auf diese Weise ermitteln wir die Effekte sämtlicher möglicher Veränderungen in der Aminosäuresequenz«, beschreibt Kelsic. Per maschinellem Lernen bringt er Computer dazu, die Auswirkungen vorherzusagen, wenn einzelne Aminosäuren-Austausche miteinander kombiniert werden. Sequenzen, die sich dabei als viel versprechend erweisen, stellt er anschließend im Labor her und testet sie an Mäusen oder nichtmenschlichen Primaten.

Kelsic zeigt sich überzeugt davon, dass ein effizienteres Einschleusen von genetischem Material zu besseren Therapien führen wird – auch wenn es um Zielgewebe wie das Gehirn geht, das sich mit AAV bereits heute recht gut erreichen lässt. Seiner Meinung nach liegt eine besonders große Herausforderung darin, Genfähren für Organe wie die Lunge und die Nieren zu finden, die derzeit schwer zu behandeln sind.

Gegen Erblindung ist bisher ist nur eine einzige Gentherapie verfügbar. Ende 2017 erteilte die US-amerikanische Arzneimittelbehörde FDA dem Therapeutikum Voretigen Neparvovec die Zulassung; es dient zum Behandeln von Netzhauterkrankungen infolge einer Mutation im Gen *RPE65*. Diese Erbanlage enthält den Bauplan für ein wichtiges Protein der Netzhaut. Laut Studien ist Voretigen Neparvovec nachweislich wirksam, und Sehbeeinträchtigungen lassen sich mittels Gentherapie erfolgreich behandeln. Allerdings gibt es mindestens 200 weitere Erbanlagen, die in mutierter Form angeborene Augenerkrankungen verursachen können. Wie Vandenberghe anmerkt, zeigt die Pharmaindustrie bislang wenig Interesse daran, spezifische Verfahren für diese Gendefekte zu entwickeln.

Ein neues Medikament zu finden und in klinischen Studien zu prüfen, kann viele Millionen Dollar kosten. Therapien für sehr seltene Erkrankungen zur Marktreife zu bringen, ist für ein Pharmaunternehmen daher wirtschaftlich kaum von Interesse. Dies gilt vor allem im Bereich der Gentherapie, weil sich die Patienten hier oft mit einer einzigen Dosis genetischen Materials erfolgreich behandeln lassen, statt lebenslang Medikamente einnehmen zu müssen. Da die Netzhaut zudem ein kleines Organ ist, fallen die bei erblichen Augenerkrankungen erforderlichen Mengen an Gentherapeutika winzig aus. Eine einzige Produktionscharge eines solches Arzneistoffs könnte genügen, um sämtliche in den USA lebenden Patienten zu therapieren.

Behandlungsverfahren für sehr seltene Genschäden

Mit einer Anfang 2018 gegründeten Firma geht Vandenberghe nun einen anderen Weg: Odylia Therapeutics soll nicht gewinnorientiert sein und Therapien für äußerst seltene angeborene Gendefekte entwickeln, die zur Erblindung führen und in den USA höchstens 3000 Menschen betreffen. Das Unternehmen wird finanziell unterstützt vom Massachusetts-Eye-and-Ear-Krankenhaus und von der Usher 2020 Foundation, einer gemeinnützigen Stiftung, die Initiativen fördert, um Sehverluste infolge des Usher-Syndroms zu behandeln. Einer der Stiftungsgründer, Scott Dorfman, hat zwei Kinder, die am Usher-Syndrom erkrankt sind, und ist Geschäftsführer von Odylia Therapeutics.

Zum Konzept der Firma gehört es, Kosten zu reduzieren, indem Kooperationspartner, die an ähnlichen Arzneistoffen arbeiten, Ressourcen und Expertise teilen. Wenn ein und dieselbe Forschergruppe die Arzneimittel entwickle, die klinischen Studien plane und die Materialien dafür produziere, ließe sich viel doppelter Aufwand vermeiden, hofft Vandenberghe. Auch baut er darauf, dass Odylia Therapeutics nach der Entwicklung von zwei oder drei erfolgreichen Therapien genügend Daten für die FDA bereitstellen kann, um die Behörde davon zu überzeugen, dass es viele Ähnlichkeiten zwischen den Arzneistoffen gibt und sich daher aus Erfahrungen mit dem einen Mittel auf die Sicherheit und Effizienz eines anderen schließen lässt. Denkbar erscheint auch, dass Odylia Therapeutics die Entwicklung eines Medikaments so weit vorantreibt, dass ein gewinnorientiertes Pharmaunternehmen es kauft und zur Marktreife bringt. Das würde die Kosten und Risiken auf Seiten der Pharmafirma reduzieren und Odylia Therapeutics Einnahmen verschaffen.

Falls Odylia Therapeutics selbst einen Arzneistoff auf den Markt brächte, dann wohl zum Selbstkostenpreis, wie Vandenberghe darlegt. Die Therapie werde dann vermutlich immer noch teuer sein, aber nicht so kostspielig, wie wenn sie auf dem üblichen Weg entwickelt worden wäre. Es besteht außerdem die Möglichkeit, dass ein Arzneimittelkandidat die klinischen Studien der Phasen I und II erfolgreich absolviert und die FDA anschließend einem »compassionate use« zustimmt, also dem Einsatz des noch nicht zugelassenen Stoffs bei schweren Krankheitsverläufen, für die es keine zufrieden stellende anderweitige Behandlung gibt. In diesem Fall gäbe es keine klinische Studie der Phase III, die einen signifikanten Wirksamkeitsnachweis zwecks Marktzulassung erbringt, beziehungsweise die meisten Patienten würden als Teilnehmer einer zeitlich nicht begrenzten Studie angesehen.

Sollten diese Strategien erfolgreich sein, könnten sie auf andere seltene Erbkrankheiten ausgedehnt werden, denen ein einzelnes defektes Gen zu Grunde liegt. Womöglich liefern sie sogar Erkenntnisse, die dazu beitragen, Gentherapien für häufigere Erkrankungen zu entwickeln. »Vielleicht erkennt die Industrie irgendwann an, dass es in diesem Bereich nicht so sehr mit Wettbewerb vorangeht, sondern eher mit Kooperation«, hofft Vandenberghe. ◂

QUELLEN

Gao, G. et al.: Clades of adeno-associated viruses are widely disseminated in human tissues. Journal of Virology 78, 2004

Pan, B. et al.: Gene therapy restores auditory and vestibular function in a mouse model of Usher syndrome type 1c. Nature Biotechnology 35, 2017

Zinn, E. et al.: In silico reconstruction of the viral evolutionary lineage yields a potent gene therapy vector. Cell Reports 12, 2015

Nature 564, S. S18–S19, 2018





PALÄOANTHROPOLOGIE
EIN NEUER MENSCH

Unsere Gattung bekommt einen weiteren Verwandten: Der zwergenhafte *Homo luzonensis* lebte vor etwa 70 000 Jahren auf einer philippinischen Insel.

Seit vielen Millionen Jahren gilt: Wer nach Luzon will, muss das Meer überqueren. Auch in Zeiten, als der Meeresspiegel weit mehr als 100 Meter tiefer lag als heute, trennte eine Wasserstraße die größte der philippinischen Inseln vom asiatischen Festland. Eine sich weitgehend isoliert entwickelnde Tier- und Pflanzenwelt gibt Zeugnis davon: Kaum eine Art kam auf die Insel, kaum eine Art kam von ihr herunter.

Zu den wenigen Ausnahmen zählt der Mensch. Seit mindestens 700 000 Jahren ist die Insel anscheinend bewohnt. Lange bevor sich der moderne *Homo sapiens* in Afrika entwickelte, hatte jemand auf Luzon ein Nashorn mit Werkzeugen aus Stein zerlegt, wie ein im Jahr 2018 vorgestellter Fund aus der Provinz Kalinga zeigte.

Ein Anhaltspunkt, wer dieser Jemand gewesen könnte, war bereits 2007 aufgetaucht, als der Archäologe Armand Salvador Mijares von der Universität der Philippinen in Quezon-Stadt mit seinem Team in der Callao-Höhle auf einen merkwürdig kleinen Fußknochen stieß. Dieser hätte mit einem Alter von 67 000 Jahren theoretisch zu einem modernen *Homo sapiens* gehören können, doch anatomisch gesehen war das ausgeschlossen. Gehörte er vielleicht einem Nachfahren jener uralten Nashornmetzger?

Eine mögliche Antwort gibt es jetzt: Jene mysteriösen Bewohner der Insel Luzon zählten aller Wahrscheinlichkeit nach zu einer Spezies, die vielleicht vor vielen Jahrhunderttausenden auf die Insel kam und hier einen eigenen Entwicklungspfad einschlug: *Homo luzonensis*.

Diesen Schluss zieht das Team um Florent Détroit vom Muséum national d'histoire naturelle in Paris, das nun einen ganzen Schwung neuer Funde präsentiert. Zu dem bereits entdeckten Fußknochen gesellen sich insgesamt zwölf weitere Skeletteile aus der Callao-Höhle, darunter Fuß- und Handknochen, Zähne und ein Oberschenkel (siehe Bild rechts). Weder DNA-Reste noch Teile des Gesichts blieben erhalten. Doch was an Skelettbestandteilen vorliegt, unterscheidet sich so grundsätzlich von anderen frühmenschlichen Überresten, dass die Forscher überzeugt davon sind, es



CALLAO CAVE ARCHAEOLOGY PROJECT

Die Oberkieferzähne von *Homo luzonensis* (oben) sind wesentlich kleiner als die von *Australopithecus afarensis* und *Homo sapiens*. Wissenschaftler fanden insgesamt 13 Skelettteile in der Callao-Höhle (links) auf Luzon, der größten philippinischen Insel.

mit einer bislang unbekannten Art zu tun zu haben.

Die winzigen Knöchelchen und Zähnchen erinnern frappierend an das Skelett des frei nach John R.R. Tolkien »Hobbit« genannten *Homo floresiensis* von der indonesischen Insel Flores. Auch diese frühen Menschen waren auf ihrem isolierten Eiland vermutlich über Jahrhunderttausende ohne Kontakt zu anderen Populationen ihre eigenen evolutionären Wege gegangen. Beide erreichten nur rund einen Meter Körpergröße und hantierten – sofern man im Luzon-Menschen den Urheber des 700 000 Jahre alten Nashornschlachtplatzes sieht – mit schlichten Steinwerkzeugen. Vermutlich war das Gehirn von *Homo luzonensis* nicht wesentlich größer als das des Flores-Menschen, dessen Hirnvolumen eher dem eines Schimpansen gleicht.

Hobbits widersetzen sich jeder Systematisierung

Im anatomischen Detail unterscheiden sich die beiden allerdings so deutlich, dass sie sich nicht als Angehörige derselben Art auffassen lassen, argumentieren die Forscher. Wie die beiden Funde in den Stammbaum des Menschen einzugliedern sind, bleibt rätselhaft. Manche Skelettmerkmale passen eher zu *Homo sapiens* als zu anderen möglichen Verwandten – was nicht sein kann, denn zu jener Zeit hatte es der anatomisch moderne Mensch noch nicht bis nach Flores oder Luzon geschafft.

Die Funde passen genauso wenig zum Kandidaten, den man nach Lage der Dinge als Vorfahren erwarten sollte: *Homo erectus*. Seitdem dessen Fossilien vor mehr als 100 Jahren in Asien gefunden wurden – darunter der »Java-Mensch« sowie der »Peking-Mensch« – galt als ausgemacht, dass es erst dieses aufrecht gehende und recht passable Werkzeuge herstellende Wesen zu Wege brachte, seinen Heimatkontinent Afrika zu verlassen.

Doch die Anatomie von Flores- und Luzon-Mensch verweist auf einen noch viel urtümlicheren Ursprung. Viele Merkmale, welche die Forscher um Détroit und Mijares an *Homo luzonensis* beobachteten und die man auch von *Homo floresiensis* kennt, erinnern nicht an *Homo erectus*, sondern an die diversen *Australopithecus*-Arten, die vor mehreren Millionen Jahren im Osten und Süden Afrikas lebten. Ebenso gibt es Parallelen zu den robusten vormenschlichen *Paranthropus*-Arten sowie zum *Homo habilis.* Gebogene Hand- und Fußknochen legen nahe, dass der neu entdeckte Luzon-Mensch sogar noch an das Klettern angepasst gewesen sein könnte.

Viele dieser archaischen Merkmale hatte *Homo erectus* längst verloren, als er aus Afrika auswanderte. Dass sie dann am anderen Ende der Welt bei seinen Nachfahren wieder auftauchen sollten, erscheint wenig glaubwürdig. Der Flores-Mensch galt noch als evolutionäre Rückentwicklung, wie sie auf isolierten Inseln mitunter vorkommt. Dasselbe Argument für eine weitere Spezies anzuführen, die ebenfalls aus dem anatomischen Rahmen fällt, hieße, den Zufall übermäßig in Anspruch zu nehmen, meint der Anthropologe Matthew Tocheri von der Lakehead University im kanadischen Thunder Bay.

All das deutet darauf hin, dass ein weiterer früher Vertreter der Gattung *Homo* aus Afrika in die Welt aufbrach und Asien erreichte. Vielleicht handelt es sich sogar um einen unbekannten Spross der *Australopithecus*-Linie. Deren Nachfahren könnten dann in der Abgeschiedenheit der südostasiatischen Inselwelt bis in die jüngste Zeit überdauert haben – als Zeitgenossen des asiatischen *Homo erectus*, der Denisovaner und schließlich des anatomisch modernen Menschen. Und natürlich den Vertretern all jener Populationen, die noch ihrer Entdeckung harren.

Jan Dönges ist Redakteur bei »Spektrum.de«.

QUELLEN

Détroit F. et al.: A new species of *Homo* from the late Pleistocene of the Philippines. Nature 568, 2019

Ingicco, T. et al.: Earliest known hominin activity in the Philippines by 709 000 years ago. Nature 557, 2018

Mijares, S.A.: New evidence for a 67,000-year-old human presence at Callao Cave, Luzon, Philippines. Journal of Human Evolution 59, 2010

MATHEMATIK
PRIMPOLYNOME

Ähnlich wie Zahlen lassen sich Polynome nicht immer in einfachere Elemente zerlegen. Im Gegensatz zu Primzahlen treten solche »Primpolynome« mit zunehmender Größe immer häufiger auf.

Primzahlen sind die Stars der Mathematik. Jeder hat von ihnen gehört, unabhängig davon, ob man sich in diesem Bereich auskennt oder nicht. Sie spielen die Hauptrolle in den berühmtesten offenen Problemen. Neben Primzahlen gibt es aber auch noch »Primpolynome«, die im Ruhm ihrer populären Geschwister beinahe untergehen. Dabei liegen auch sie etlichen wichtigen Fragestellungen zu Grunde.

Ein Polynom besteht aus einer Summe von Variablen *x* hoch einer Potenz, die mit entsprechenden Koeffizienten ai multipliziert werden, wie zum Beispiel $a_1 x + a_2 x^2 + \ldots + a_n x^n$. Genau wie Zahlen lassen sich Funktionen addieren, subtrahieren, multiplizieren und teilen. Falls ein Polynom mit ganzzahligen Koeffizienten nicht als Produkt zweier einfacherer ganzzahliger Polynome zerlegt werden kann, hat man es mit einem Primpolynom zu tun. Mathematiker nennen solche Gebilde irreduzibel. Tatsächlich lassen sich viele Probleme verschiedenster Bereiche auf Fragen über Polynome herunterbrechen. Dabei ist es essenziell zu wissen, wie häufig Primpolynome auftreten.

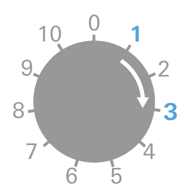
Angesichts der Vielfalt an möglichen Termen, die aus beliebig vielen Variablen und Koeffizienten bestehen können, gestaltet sich diese Aufgabe allerdings schwierig. Deshalb haben Mathematiker das Problem in früheren Arbeiten eingegrenzt. Im Oktober 2017 zeigten beispielsweise die zwei israelischen Experten Lior Bary-Soroker und Gady Kozma, dass fast alle Polynome mit einem bestimmten eingeschränkten Koeffizientenbereich irreduzibel sind.

Random Walk

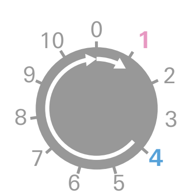
Mit so genannten »Random Walks« untersuchen Mathematiker, ob sich Polynome in einfachere Bestandteile zerlegen lassen.

Random Walk auf einem Zifferblatt
Eine Person steht auf einem Zifferblatt mit bloß elf Einträgen und startet auf der Eins.

Die Person wählt eine Zahl – beispielsweise drei – und multipliziert sie mit der Ziffer, auf der sie gerade steht: 1 · 3 = 3. Die Person geht zu dieser Zahl.



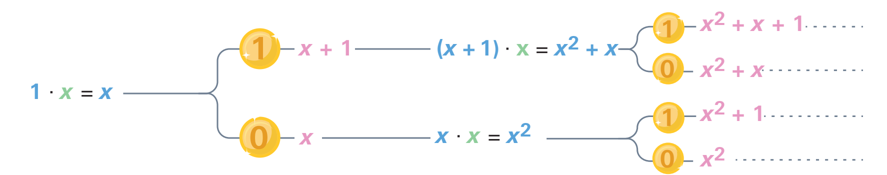
Nun wirft sie eine Münze. Bei Kopf geht sie einen weiteren Schritt nach vorne (4). Bei Zahl bleibt sie stehen.



Der Vorgang wiederholt sich: Die Person multipliziert ihre Position (4) mit drei (= 12 = 11 + 1). Falls die Zahl größer als 11 ausfällt, teilt sie die Zahl durch 11 und nimmt den Rest (hier: 1). Dann geht sie zu dieser Position und wirft wieder eine Münze.

Mathematiker interessiert, wie lange es dauert, bis die Person auf allen Ziffern der Uhr mindestens einmal stehen geblieben ist. Und wann sie alle Stellen ungefähr gleich häufig besucht hat.

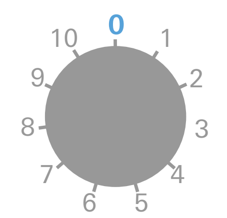
Wie Polynome aus einem Random Walk entstehen



Spielen Sie den oben beschriebenen Random Walk für eine allgemeine Zahl *x* durch. Die neue Position der Person ist nach den ersten zwei Schritten entweder *x* oder *x* + 1.

Wiederholen Sie den Prozess, indem Sie die Position der Person wieder mit *x* multiplizieren und entweder eine Null oder eine Eins addieren. Nach dieser Runde entspricht die neue Position der Person einem der vier Polynome mit Koeffizienten 0 und 1.

Primpolynome finden: Die oben genannten Schritte kann man für verschiedene Zifferblätter wiederholen. Primpolynome besitzen durchschnittlich nur einen Wert *x*, der die Person für alle möglichen Uhren, deren Zifferblatt von null bis zu einer Primzahl geht, zum Punkt null führt.



LUCY READING-IKKANDA / QUANTA MAGAZINE; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Emmanuel Breuillard und Péter Varjú von der University of Cambridge haben sich ein Jahr später dagegen mit allgemeinen Polynomen beschäftigt. In ihrer erstaunlichen Arbeit bestätigten sie dadurch eine 25 Jahre alte Vermutung, die handfeste Folgen für ein weit verbreitetes Verschlüsselungsverfahren hat.

Schon 1993 mutmaßten der Mathematiker Andrew Odlyzko von der University of Minnesota und sein Kollege Bjorn Poonen, der heute am Massachusetts Institute of Technology arbeitet, dass reduzible Polynome mit wachsender Komplexität im Meer der Primpolynome untergehen. Zu diesem Schluss führte sie eine simple Überlegung. Primzahlen sind unter den kleinen Zahlen weit verbreitet, werden danach aber immer seltener. Das liegt daran, dass die Liste der möglichen Teiler für große Zahlen immer länger wird. Bei Polynomen ist das anders.

Zum Scheitern verurteilt

Damit ein Polynom faktorisierbar ist, müssen seine Koeffizienten im richtigen Verhältnis zueinander stehen. $x^2 + 5x + 6$ kann beispielsweise zu zwei Faktoren $(x + 3)$ und $(x + 2)$ zerlegt werden, weil es zwei ganze Zahlen 2 und 3 gibt, die addiert den zweiten Koeffizienten 5 ergeben und multipliziert den dritten (6) liefern. Polynome mit zusätzlichen Termen führen zu wesentlich mehr und komplizierteren Bedingungen. Somit wird es immer unwahrscheinlicher, dass es Faktoren mit ganzzahligen Koeffizienten gibt, die sie alle erfüllen.

Weil ein allgemeiner Beweis dieser Vermutung außer Reichweite war, beschränkten Odlyzko und Poonen ihr Problem auf Polynome, deren Koeffizienten lediglich die Werte null oder eins haben. Doch selbst in vereinfachter Form dauerte es 25 Jahre, bis ihr Verdacht bestätigt wurde – unter der Bedingung, dass die berühmte riemannsche Vermutung korrekt ist.

Breuillard und Varjú stießen durch Zufall auf dieses Ergebnis. Denn sie beschäftigten sich nicht direkt mit Primpolynomen, sondern interessierten sich für die Mathematik eines »Random Walks«. Sie stellten sich dabei eine Person auf einem Zifferblatt vor, das gleichmäßig von eins bis elf eingeteilt ist. Die Person steht am Anfang auf der Eins und denkt sich eine ganzzahlige Zahl x. Diese multipliziert sie mit der Zahl, auf der sie steht, und geht zu der entsprechenden Stelle auf dem Zifferblatt. Dann wirft sie eine Münze. Bei Zahl bleibt sie stehen, bei Kopf geht sie noch einen Schritt weiter. Dann beginnt der Vorgang von Neuem: Multiplizieren der gedachten Zahl x mit der Zahl, auf der sie steht, Münzwurf und entsprechend eventuell einen Schritt weiter gehen. Sobald ihr Ergebnis größer als elf ist, läuft die Person einfach rund um die Uhr weiter, bis sie die erforderliche Anzahl an Schritten erreicht hat. Solche »Uhren-Mathematik« (so genannte modulare Zahlensysteme) taucht in vielen Fragestellungen auf.

Hintertür in der RSA-Verschlüsselung

Eines der wichtigsten heutigen Verschlüsselungsverfahren ist die RSA-Verschlüsselung. Sie ähnelt dem denkbar einfachsten Codierungsschema: Man ordnet jedem Buchstaben einer geheimen Nachricht eine Zahl zu und multipliziert diese mit einer zuvor vereinbarten Zahl. Um den Code zu entschlüsseln, teilt man die Ziffernfolge einfach durch die geheime Zahl.

Bei der RSA-Verschlüsselung führt ein Benutzer mit seiner Nachricht mehrere Rechenschritte durch, unter anderem multipliziert er sie mit einer sehr großen Zahl (Hunderte von Stellen lang). Um die Nachricht zu entschlüsseln, muss man die Primfaktoren des entstandenen Produkts herausfinden. Die Sicherheit dieser Methode beruht auf der Tatsache, dass es keinen schnellen Weg gibt, um Primfaktoren großer Zahlen zu berechnen.

Allerdings hat dieses Verfahren eine Hintertür. Jede Zahl lässt sich eindeutig durch ein Polynom mit den Koeffizienten null und eins darstellen; und während es schwierig ist, Zahlen zu faktorisieren, gibt es effiziente Algorithmen, die ein Polynom in einfachere Bestandteile zerlegen. Sobald man die Teiler eines Polynoms kennt, lassen sich daraus die Primfaktoren der ursprünglichen Zahl bestimmen.

So funktioniert es:

1. Wählen Sie eine Zahl, zum Beispiel 15.
2. Drücken Sie 15 in binäre Schreibweise aus: 1111 = 23 + 22 + 21 + 20.
3. Verwandeln Sie diesen Ausdruck in ein Polynom, indem Sie die Ziffern als Koeffizienten eines Polynoms behandeln: $x^3 + x^2 + x + 1$. Für $x = 2$ entspricht dieses Polynom der Zahl 15.
4. Faktorisieren Sie das Polynom: $(x^2 + 1) \cdot (x + 1)$.
5. Setzen Sie $x = 2$ in jeden dieser Faktoren ein: (22 + 1) = 5, (2 + 1) = 3.

Fazit: 5 und 3 sind die Primfaktoren von 15.

Dieser scheinbar komplizierte Weg, um die Teiler von 15 zu finden, erweist sich bei großen Zahlen als überaus nützlich. Wie der neue Beweis von Breuillard und Varjú aber zeigt, ist die RSA-Verschlüsselung dadurch nicht in Gefahr: Denn nicht jede faktorisierbare Zahl entspricht einem reduziblen binären Polynom, wie das Beispiel 25 (= 24 + 23 + 1) zeigt. $x^4 + x^3 + 1$ ist nämlich ein Primpolynom, obwohl 25 keine Primzahl ist. Je größer ein Polynom, desto unwahrscheinlicher lässt es sich zerlegen. Da die enorm großen Zahlen im RSA-Verfahren riesigen Polynomen entsprechen, schwindet die Wahrscheinlichkeit, dass sie faktorisierbar sind.

Breuillard und Varjú wollten dabei zwei Dinge herausfinden: Wie lange dauert es, bis die Person auf jedem Punkt im Zifferblatt mindestens einmal stehen geblieben ist? Und wann hat sie jeden Ort ungefähr gleich oft besucht?

Um diese Fragen zu beantworten, müssen Breuillard und Varjú die möglichen Wege der Person nachvollziehen. Diese lassen sich durch Polynome beschreiben, mit der gewählten Zahl x als Variable und null oder eins als Koeffizienten (siehe »Random Walk«, S. 26). Die Zeitspanne, bis jeder Ort ungefähr gleich oft abgelaufen ist, hängt von x ab. Denn jede Lösung eines Polynoms entspricht einem Punkt auf dem Zifferblatt. Die Aufgabe von Breuillard und Varjú läuft daher darauf hinaus, herauszufinden, wie viele Lösungen ein Polynom in einem bestimmten modularen Zahlensystem hat. Und wie sich zeigte, hängt das damit zusammen, ob es irreduzibel ist.

Frühere Arbeiten aus den 1980er Jahren hatten nämlich gezeigt, dass die Anzahl der Nullstellen eines Polynoms die Anzahl seiner Faktoren mit ganzzahligen Koeffizienten widerspiegelt: Wenn ein Polynom in allen modularen Zahlensystemen durchschnittlich drei Nullstellen hat, dann hat es auch drei Teiler. Gibt es im Durchschnitt nur eine Lösung, dann hat es lediglich einen Faktor, und das Polynom ist irreduzibel.

Mit dieser Methode haben Breuillard und Varjú bewiesen, dass die Wahrscheinlichkeit, irreduzible Polynome anzutreffen, für immer größere Terme (mit Koeffizienten null oder eins) gegen 100 Prozent strebt. Doch ihr Ergebnis ist lückenhaft. Es hängt von der Richtigkeit der riemannschen Vermutung ab, einer der wichtigsten ungelösten mathematischen Hypothesen, von der die meisten Experten aber annehmen, dass sie stimmt.

Zwar hatten Mathematiker auch schon früher erwartet, dass Primpolynome mit wachsender Komplexität die Oberhand gewinnen, doch sie dachten, dass ihr Anteil viel geringer sei, als es das Ergebnis von Breuillard und Varjú voraussagt. Falls die riemannsche Vermutung zutreffen sollte, sind praktisch alle komplizierten Polynome mit Koeffizient null oder eins irreduzibel. Das hat auch handfeste Folgen: Gerade Kryptografen dürften aufatmen, denn faktorisierbare Polynome können das gängige digitale RSA-Verschlüsselungsverfahren untergraben (siehe »Hintertür in der RSA-Verschlüsselung«, S. 27).

Kevin Hartnett ist Wissenschaftsjournalist in Columbia (South Carolina).

QUELLEN

Bary-Soroker, L., Kozma, G.: Irreducible polynomials of bounded height. ArXiv: 1710.05165, 2017

Breuillard, E., Varjú, P.: Irreducibility of random polynomials of large degree. ArXiv: 1810.13360, 2018

Von »Spektrum der Wissenschaft« übersetzte und redigierte Fassung des Artikels »In the universe of equations, virtually all are prime« aus »Quanta Magazine«, einem inhaltlich unabhängigen Magazin der Simons Foundation, die sich die Verbreitung von Forschungsergebnissen aus Mathematik und den Naturwissenschaften zum Ziel gesetzt hat.



SYNTHETISCHE BIOLOGIE
GENETISCHES ALPHABET VERDOPPELT

Zusätzlich zu den vier vorhandenen Buchstaben haben US-Forscher vier neue geschaffen, mit denen die DNA genetische Informationen speichern kann. Der Achtercode funktioniert wie sein biologisches Vorbild – und beweist, dass Lebensprozesse auch mit ungewöhnlichen Molekülen möglich sind.

Das Erbmolekül Desoxyribonukleinsäure (DNA) jeder Lebensform unserer Erde speichert Informationen mit Hilfe von nur vier Schlüsselmolekülen: den Basen Guanin, Cytosin, Adenin und Thymin (abgekürzt als G, C, A und T). Nun haben Wissenschaftler die Zahl dieser essenziellen Bausteine im DNA-Molekül verdoppelt und so eine neue synthetische Gensprache mit acht statt vier Buchstaben erschaffen. Das erweiterte genetische Alphabet kann offenbar Informationen wie in der natürlichen DNA codieren. Das sollte theoretisch auch in Organismen funktionieren, berichtet ein US-amerikanisches Forscherkonsortium unter der Leitung des Biochemikers Steven Benner.

Die vier bekannten DNA-Basen formen normalerweise Paare im Inneren der Doppelhelix, die aus zwei umeinander gewundenen Strängen besteht: A bildet Brücken mit T, G mit C. Seit Langem versuchen Wissenschaftler, diesen Vierercode künstlich zu erweitern. Benner war es schon in den 1980er Jahren gelungen, unnatürliche Basen in DNA-Doppelstränge zu integrieren. Der Molekularbiologe Floyd Romesberg vom Scripps Research Institute in La Jolla brachte 2014 ein nicht natürlich vorkommendes Basenpaar in lebende Zellen. Benners jetzige Studie belegt nun erstmals, wie die komplementären, nicht natürlichen Basen zusammenfinden und aneinanderkoppeln – wobei die Doppelhelix aus DNA-Strängen ihre Bauweise behält.

Benners Team ging von der Molekülstruktur der natürlichen DNA-Bausteine aus, die über Wasserstoffbrücken an die jeweilige Partnerbase gebunden sind. Dabei stehen sich Wasserstoffatome und Stickstoff- oder Sauerstoffatome räumlich gegenüber, so dass sie sich gegenseitig anziehen.

In natürlicher DNA ist die Information in der Abfolge der Basen Cytosin (C), Guanin (G), Thymin (T) und Adenin (A) verschlüsselt, wobei sich C mit G sowie T mit A über Wasserstoffbrücken paart (links). Forscher fügten diesem Vierercode strukturell ähnlich gebaute Basen hinzu. Hierbei koppelt Z an P und S an B (rechts). R steht für den Zucker- (Desoxyribose-) und den Phosphatanteil des jeweiligen Nukleotids.

Das sei wie bei Legosteinen, bei denen Löcher und Noppen genau passen müssen, erklärt Benner.

Durch den Umbau molekularer Noppen und Löcher hatten die Wissenschaftler bereits 2015 mehrere neue DNA-Basen erzeugt – darunter korrespondierende Paare namens S und B sowie P und Z (siehe Grafik oben). Jetzt probierten sie, wie diese synthetischen Basen mit den natürlichen Varianten kombiniert werden können. Dabei entstand eine molekulare Kunstsprache, welche die Forscher nach den japanischen Bezeichnungen für »acht« und »Buchstabe« auf den Namen Hachimoji tauften. Die zusätzlichen Bausteine ähneln strukturell jeweils einer natürlichen DNA-Base mit leichten Abweichungen bei der Wasserstoffbrückenbindung.

Um ihre Fähigkeit als Lebensmolekül zu beweisen, musste die künstliche DNA einige Tests bestehen: Tatsächlich paarten sich bei hunderten synthetischen DNA-Molekülen die künstlichen Basen mit ihrem jeweiligen Partner ähnlich zuverlässig wie die natürlichen – die synthetischen Moleküle eignen sich also als Informationsspeicher.

Im nächsten Schritt zeigten die Forscher, dass die Struktur dieser Doppelhelices stabil bleibt – und zwar unabhängig von der Reihenfolge der synthetischen Basen. Das ist wichtig, da nur hochvariable Basensequenzen, die nicht das gesamte DNA-Konstrukt auseinanderfallen lassen, eine Evolution erlauben. Mit Hilfe von Röntgenbeugung an Molekülkristallen bestätigte das Team, dass synthetische DNA-Stränge mit drei verschiedenen Sequenzen ihre Struktur beibehalten.

Gelungene Übersetzung in RNA

Andere Methoden zur Erweiterung des genetischen Alphabets hatten hier nach Angaben des nicht an Benners Arbeit beteiligten englischen Molekularbiologen Philipp Holliger versagt: Hierbei waren lipophile, also nicht wasserlösliche Moleküle eingesetzt worden, die sich nicht per Wasserstoffbrücken verpaarten. Man konnte sie zwar in gewissen Abständen zueinander zwischen natürlichen Basen in die DNA-Kette platzieren – nicht aber direkt nebeneinander, weil dies die Helixstruktur zerstörte.

Schließlich demonstrierten die Forscher, dass sich die synthetische DNA buchstabengetreu in RNA umschreiben lässt. Das ist die Voraussetzung dafür, um Proteine zu erzeugen, die Arbeitspferde des Lebens. Um jenen Schritt sichtbar zu machen, schuf Benners Team synthetische DNA-Abschnitte, die für ein so genanntes Aptamer codieren – eine RNA-Sequenz, die sich an bestimmte Moleküle bindet und eine Fluoreszenz auslöst. Hierbei bestätigte sich, dass das Umschreiben (die so genannte Transkription) funktioniert.

Philipp Holliger sieht in der Arbeit zwar einen viel versprechenden Ausgangspunkt, es bleibe jedoch noch ein weiter Weg bis zu einem echten synthetischen Gencode mit acht Buchstaben. So sei noch unklar, ob Polymerasen, also DNA synthetisierende Enzyme, die künstliche DNA replizieren können. Benner betont, sein Team habe immerhin gezeigt, dass Leben auch mit anders gestalteten DNA-Basen möglich ist. Und das könne bei der Suche nach biologischen Signaturen im Universum eine Rolle spielen.

Eine eher bodenständige Vision für die neu hinzugefügten DNA-Buchstaben wäre, die vielfältigeren DNA- oder RNA-Sequenzen andere Funktionen als das Datenspeichern erledigen zu lassen. Beispiele hierfür hat Benners Gruppe schon geliefert: DNA-Stränge mit Z und P binden sich besser an manche Krebszellen als Sequenzen mit den vier Standardbasen. Das Forscherteam hat zudem weitere Paare synthetischer Basen entwickelt. Sie eröffnen die Möglichkeit, DNA-Strukturen mit zehn oder sogar zwölf Buchstaben zu konstruieren.

Matthew Warren ist promovierter Neurowissenschaftler und Wissenschaftsjournalist.

QUELLEN

Georgiadis, M. M. et al.: Structural basis for a six nucleotide genetic alphabet. Journal of the American Chemical Society 137, 2015

Hoshika, S. et al.: Hachimoji DNA and RNA: A genetic system with eight building blocks. Science 363, 2019

Zhang, L. et al.: Evolution of functional six-nucleotide DNA. Journal of the American Chemical Society 137, 2015

QUANTENPHYSIK
SCHRÖDINGERS KATZE ERWEITERT IHR REVIER

Physiker haben eines der berühmtesten Gedankenexperimente der Wissenschaftsgeschichte auf neuartige Weise im Labor verwirklicht – ganz ohne Versuchsstiere.

Deutsche Forscher haben auf raffinierte Weise zwei scheinbar getrennte Welten miteinander verknüpft: die bizarre Quantenphysik und die anschauliche klassische Physik. Konkret hat das Team um Gerhard Rempe vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching das bekannte Gedankenexperiment von »Schrödingers Katze« erstmals mit einem Laserpuls umgesetzt, der frei durch das Labor flog. Diese Variante der gleichzeitig lebenden und toten Katze könnte aus Sicht der Forscher sogar eine technische Anwendung haben. »Was vor 80 Jahren ein rein intellektuelles Gedankenspiel war, können wir immer besser praktisch umsetzen«, sagt Rempe.

In den 1930er Jahren hatten Physiker wie Erwin Schrödinger und Werner Heisenberg die Quantenmechanik entwickelt. Mit ihren Gleichungen skizzierten die Wissenschaftler eine befremdliche Realität: Den Gesetzen der Quantenphysik zufolge ist die Welt der Atome und Elementarteilchen »verwaschen«, wie Schrödinger schrieb. Er meinte damit, dass sich Objekte nicht mehr exakt verorten lassen. Vielmehr kann man nur eine Wahrscheinlichkeit dafür angeben, ein Quantenobjekt an einem bestimmten Ort vorzufinden.

Dies spiegelt nicht das Unwissen des Experimentators wider, sondern die Realität des Mikrokosmos. Ein Elektron oder ein Atom lässt sich demnach ähnlich einer Welle beschreiben, die sich nicht auf einen Punkt festzurren lässt, sondern ein ganzes Gebiet einnimmt. Erst ein Beobachter, der das Teilchen registriert, legt fest, an welchem Ort die Welle auf einen Punkt kollabiert – so sieht es zumindest die verbreitete »Kopenhagener Deutung« der Quantenphysik vor.

Erwin Schrödinger haderte mit den Implikationen dieser Interpretation. Durch ein Gedankenspiel wollte er 1935 zeigen, dass die Unschärfe des Mikrokosmos zu Paradoxien führt, wenn man sie in die Alltagswelt überführt. Er stellte sich eine geschlossene Kiste vor, die radioaktive Atome und eine Katze enthält. Ein Geigerzähler registriert, wenn einer der Atomkerne zerfallen ist. Das Ausschlagen des Geräts setzt wiederum Gift frei, das die Katze tötet.



Bei Schrödingers Katze entscheidet der Zerfall eines Atomkerns, ob ein Giftfläschchen geöffnet wird. Mathematisch entspricht das dem Kollaps einer Wellenfunktion.

CHRISTOPH HOHMANN, NANOSYSTEMS INITIATIVE MUNICH (NIM)

Tot und lebendig?

Schrödinger nahm an, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Atom zerfallen ist, nach einer Stunde 50 zu 50 beträgt. Solange niemand in die Box schaut, wären beide Möglichkeiten real, argumentierte der Österreicher. So sehen es schließlich die Gesetze der Quantenphysik vor, die für den Atomkern gelten. Und weil das Schicksal der Katze mit diesem verbunden ist, sind ihre beiden Zustände gleich wirklich: Das Tier ist gewissermaßen sowohl tot als auch lebendig.

Aus Sicht von Physikern sind Katze und Atom miteinander »verschränkt«. Erst wenn ein Mensch den Deckel öffnet, fällt die Entscheidung über das Schicksal des Tiers. Das aber widerspricht unserer Alltagserfahrung, betonte Schrödinger. Physiker folgern daher seit Langem: Es muss eine Grenze zwischen dem Mikrokosmos mit seinen Quantenregeln und unserem Makrokosmos mit den Gesetzen der uns vertrauten Physik geben.

Die Forscher glauben dabei nicht an einen harten Bruch, sondern an einen gemächlichen Übergang. Demnach kann prinzipiell auch ein makroskopisches Objekt in der Überlagerung zweier Zustände verharren, wenn man es von allen Umwelteinflüssen isoliert. Aber schon der Zusammenstoß mit einem Luftmolekül liefert Information über das Objekt und ist somit das, was Physiker eine »Beobachtung« nennen.

Sie zwingt die Natur, eine der denkbaren Möglichkeiten zu realisieren.

Vermeidet man hingegen den Kontakt zur Umwelt, sollte es möglich sein, gegensätzliche Zustände simultan zu erzeugen. Zu Schrödingers Zeiten war die experimentelle Physik dazu noch nicht fähig. Doch das änderte sich am Ende des 20. Jahrhunderts. Physiker haben seitdem verschiedene Analogien zu Schrödingers Katze im Labor umgesetzt. Dabei versuchen sie, sich immer näher an die klassische Welt heranzutasten, also Quantenobjekte mit möglichst leicht erfassbaren, eindeutigen Eigenschaften zu verwenden. So haben die Forscher das Revier von Schrödingers Katze zunehmend erweitert.

Beispielsweise verschränkten sie zwei mikroskopische Zustände eines Teilchens mit zwei konträren klassischen Eigenschaften desselben. Als Erstes gelang das 1996 einem Team um den späteren Physik-Nobelpreisträger David Wineland vom International Institute of Standards and Technology in Boulder, Colorado. Es verschränkte zwei Zustände der Elektronenhülle eines Ions mit zwei scharf festgelegten Aufenthaltsorten desselben. Eine klare Lokalisierung ist ein typisch klassisches Merkmal. Dadurch befand sich das Ion gleichzeitig an zwei definierten Plätzen, deren Abstand fast 1000-mal so groß war wie das Atom selbst.

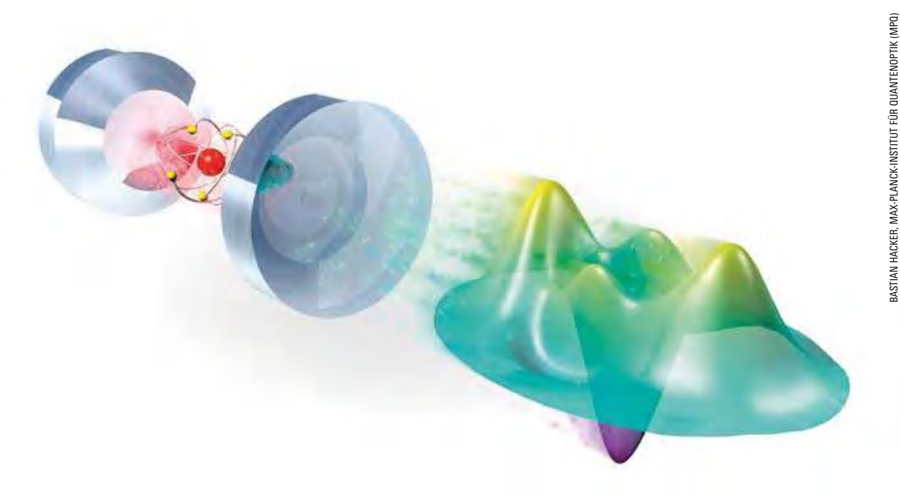
Es folgten weitere Experimente. Immer beliebter wurden »Katzenzustände« in Form von Licht, wie sie nun auch Rempes Team verwirklicht hat. Mit ihnen lässt sich gewissermaßen klassische Physik in Reinkultur studieren: Licht als Welle hat immer eine klar definierte Phase, welche die momentane Wellenhöhe beschreibt. Bei einer Wasserwelle legt die Phase zum Beispiel fest, ob das Nass gerade bis zum Knie steht oder bis zum Hals.

Würden die Gesetze der Quantenwelt am Badestrand gelten, könnte eine Welle einem Menschen gleichzeitig bis zum Knie und bis zum Hals reichen. Solch eine Welle wäre ein Beweis, dass die Quantenwelt in die klassische Welt hineinwirkt. So weit sind Physiker natürlich noch nicht. Aber mit Lichtwellen ist dem Garchinger Team um Bastian Hacker nun ein ähnliches Experiment geglückt.

Eine Lichtwelle übernimmt die Rolle der Katze

Die Physiker ließen letzlich einen Laserpuls mit zwei überlagerten Phasenzuständen drei Meter frei durchs Labor fliegen. »Die größte Herausforderung dabei war, dass niemand hinsieht«, sagt Rempe. Der fliegende Puls musste also von seiner Umwelt isoliert bleiben. Dafür sorgten optische Bauteile wie Spiegel oder Linsen höchster Qualität, die Licht so gut wie nicht absorbierten oder streuten.

Der Versuchsaufbau der Garchinger Forscher war dabei auf den ersten Blick recht einfach. Zwei Spiegel standen einander in einem Abstand



BASTIAN HACKER, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR QUANTENOPTIK (MPQ)

Schrödingers Katze im Labor: Ein Atom zwischen zwei Spiegeln verharrt in einer Überlagerung zweier Zustände (links). Verschränkt man eine Lichtwelle mit dem Atom, übernimmt sie gewissermaßen die Unbestimmtheit und trägt diese anschließend als überlagerten »Katzenzustand« durch den Raum (rechts).

von 0,5 Millimetern gegenüber. Licht mit der passenden Frequenz konnte in den Hohlraum dazwischen eindringen, darin hin- und hergeworfen werden und wieder austreten. Dabei verschob sich die Phase der Lichtwelle um 180 Grad. Wo erst ein Wellenberg war, befand sich anschließend ein Wellental – und umgekehrt. Licht anderer Frequenzen gelangte nicht in den Hohlraum, sondern wurde ohne Phasenverschiebung an dessen Außenwand reflektiert.

In der Mitte einer kleinen Vakuumkammer zwischen den Spiegeln hielten die Forscher ein einzelnes Atom des Elements Rubidium in der Schwebe. Dieses brachten sie geschickt dazu, in einer Überlagerung zweier Zustände zu verharren. Es fungierte in dem Experiment als eine Art Türsteher: Der eine Zustand veränderte die Frequenz, die das Licht braucht, um in den Hohlraum eindringen zu können. In diesem Fall verhinderte das Atom den Zutritt des Laserpulses in den Hohlraum. Der andere Zustand ließ alles beim Alten: Das Licht hatte freien Zugang.

Das Ganze stellte damit eine ausgeklügelte Variante von Schrödingers Gedankenexperiment dar. Der Laserpuls übernahm die Rolle der Katze, schließlich ist die Phase einer Lichtwelle eine klar definierte Eigenschaft, die sich makroskopisch bestimmen lässt. Das Atom im Hohlraum hingegen unterlag dem Wahrscheinlichkeitscharakter der Quantenphysik, es diente also als Analogon zum radioaktiven Atomkern in der Box der Katze. Welchen Zustand es einnimmt, ließ sich von außen nicht sagen.

Ein Qubit auf Reisen

Aber in dem Experiment bildete sich eine Verschränkung zwischen Lichtwelle und Rubidiumatom aus, ganz so wie in Schrödingers Experiment zwischen Katze und radioaktivem Atomkern. Statt sich für eine Möglichkeit zu entscheiden, trat der Laserpuls in dem Experiment einerseits in den Hohlraum ein, andererseits blieb er draußen. Entsprechend verschob sich einerseits seine Phase um 180 Grad, andererseits tat sie das nicht. Somit erweiterte sich die Überlagerung der Zustände vom Rubidiumatom auf die Lichtwelle – und konnte sich anschließend mit dem Laserstrahl im Raum ausbreiten. Um die Gleichzeitigkeit von »tot« und »lebendig« zu verifizieren, leiteten die Forscher den Puls anschließend zu einem Detektor, wo sich die Wellenzustände überlagerten und so ihren gemischten Charakter offenbarten.

Die Arbeit sei ein signifikanter Fortschritt für die Nutzung von »Katzenzuständen« in Quantennetzwerken, kommentiert Florian Marquardt vom Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen, der nicht an der Studie beteiligt war. Ein solches Netz würde Quanteninformation vermitteln, also Quantencomputer verbinden oder abhörsichere Botschaften austauschen.

»Unser Katzenzustand ist ein Qubit, das man auf Reisen schicken kann«, sagt Rempe. Qubits speichern und verarbeiten die zwei Bitwerte 0 und 1 simultan. Herkömmliche Bits müssen sich für jeweils einen der Werte entscheiden. Zwar lassen sich reisende Qubits schon jetzt mit einzelnen Photonen verwirklichen. Doch auf Knopfdruck gelang das bisher nicht. Die Arbeit der Garchinger Forscher hingegen erzeuge »zum ersten Mal auf deterministische Art und Weise Katzenzustände«, erklärt Marquardt. Das heißt, das Qubit entsteht mit 100-prozentiger Sicherheit bei jedem Versuch. Für die Quantentechnik braucht man solche Zuverlässigkeit. Zudem sei die Methode »konzeptionell sehr schön, da relativ einfach«, sagt der Physiker. Das verspreche robuste Geräte.

Allzu weit reist die Garchinger Variante von Schrödingers Katze indessen noch nicht, wie Rempe einräumt. Für Quantennetzwerke bräuchte man Verbindungen über Kilometer hinweg. Noch bessere optische Elemente könnten die Reichweite erhöhen: »Ein weiterer nächster Schritt wäre, die fliegende Schrödingerkatze in einem Quantenspeicher einzufangen«, sagt der Physiker. »Dann könnte die übertragene Quanteninformation am Zielort weiterverarbeitet werden.«

Christian J. Meier ist promovierter Physiker und Wissenschaftsjournalist in Groß-Umstadt.

QUELLEN

Hacker, B. et. al.: Deterministic creation of entangled atom-light Schrödinger-cat states. Nature Photonics 13, 2019

Monroe, C. et. al.: A Superposition State of an Atom. Science 272, 1996



SPRINGERS EINWÜRFE
HIERARCHIEN IM HIRN

Um sich einen Reim auf Überraschungen zu machen, müssen separate Gruppen von Gehirnzellen einander gestaffelt zuarbeiten.

Michael Springer ist Schriftsteller und Wissenschaftspublizist. Eine neue Sammlung seiner Einwürfe ist 2019 als Buch unter dem Titel »Lauter Überraschungen. Was die Wissenschaft weitertreibt« erschienen.

▸▸ spektrum.de/artikel/1647836

Angenommen, Sie sind zum Essen eingeladen, und da es Ihnen wunderbar schmeckt, bitten Sie um das Rezept. Doch als Sie die Speise selbst zubereiten, ist sie ungenießbar. Da fragen Sie sich: Habe ich beim Kochen etwas falsch gemacht, oder ist das Rezept fehlerhaft? Fortwährend sind wir mit Überraschungen konfrontiert, deren Ursache nicht auf der Hand liegt. In der Regel glauben wir erst an einen Zufall und versuchen das Nächstliegende: Der Koch wiederholt das Rezept. Erst wenn die Misserfolge nicht enden, sehen wir ein, dass etwas prinzipiell nicht stimmt.

Wie kommt das Gehirn von Tieren und Menschen zu der – mitunter lebenswichtigen – Erkenntnis, welche Ursache sich hinter einem unerwarteten Ereignis verbirgt? Sind für diese kognitive Leistung spezielle Areale zuständig, und wie arbeiten sie zusammen?

Die Frage haben die Hirnforscher Mehrdad Jazayeri und Morteza Sarafyazd vom Massachusetts Institute of Technology an Primaten untersucht. Sie konfrontierten Makaken mit Abfolgen von Lichtreizen und brachten den Tieren durch kleine Belohnungen bei, je nach der zeitlichen Abfolge der Farbpunkte mit Hin- oder Wegsehen zu reagieren. Letzteres garantierte, dass mehr zu Stande kam als ein bloßer Reiz-Reaktions-Automatismus *(Science 364, eaav8911, 2019)*.

Nachdem die Makaken gelernt hatten, eine bestimmte Reizabfolge mit entsprechenden Blickbewegungen zu quittieren, drehten die Forscher den Rhythmus der Farbblitze um. Jetzt bildeten diese eine neue, wiederum regelmäßige Abfolge. Die Tiere standen nun vor dem Dilemma, darin bloß eine zufällige, vorübergehende Störung zu sehen – oder die systematische Änderung zu erkennen. Tatsächlich dauerte es nur kurz, bis den Primaten diese Erkenntnis gelang und sie auf das neue System wiederum mit entsprechend angepassten Augenbewegungen antworteten.

Wie registriert das Gehirn, was für eine Ursache sich hinter einem unerwarteten Ereignis verbirgt?

Was ging dabei in den Versuchstieren vor? Während der modifizierten Blickversuche ließ sich eine besonders hohe Aktivität in zwei Regionen des Vorderhirns feststellen: im dorsomedialen frontalen Kortex (DMFC) und im knapp darunterliegenden anterioren zingulären Kortex (ACC). Diese Gebiete waren von vornherein »verdächtig« – sie sind auf Handlungskontrolle, kognitive Prozesse und strategische Entscheidungen spezialisiert.

Der Clou der Studie ist aber der Nachweis einer hierarchischen Zusammenarbeit beider Regionen. Die Information über die neue Reizfolge landet nämlich zunächst »außen« beim DMFC und wird dort nur als Überraschung registriert, als enttäuschte Erwartung. In dieser Phase kann noch nicht entschieden werden, ob es sich um eine vorübergehende Störung handelt, auf die man am besten mit »business as usual« reagiert, oder um etwas grundlegend Neues, das kognitive Verarbeitung und geändertes Verhalten erfordert.

Die Entscheidung darüber fällt »innen« im ACC, der als Informationspuffer wirkt und auf die neue Nachricht verzögert reagiert. Erst wenn hier erkannt wird, dass sich etwas dauerhaft verändert hat, kann sich das Individuum an die neue Situation anpassen. Die derart hierarchisch organisierte Kognition des Primatengehirns scheint also eines der Geheimnisse jener höheren Erkenntnisleistungen zu sein, die ihm vorderhand kein künstliches neuronales Netz nachzumachen vermag.



CHRISTOFFER RUDQUIST

ARCHÄOLOGIE

DIE NADEL IM KNOCHENHAUFEN

In Knochensplittern liegen oft erstaunliche Informationen über die frühe Menschheitsgeschichte verborgen. Doch die winzigen Fragmente verraten für sich betrachtet kaum etwas über ihre Herkunft. Hier helfen Untersuchungen von Proteinen weiter, die sich in den fossilen Überresten erhalten haben.

CHRISTOFFER RUDQUIST

Unter kleinsten fossilen Knochensplittern aller möglichen Tierarten können sich wertvolle menschliche Überreste verstecken.





Thomas Higham ist Professor für Archäologie an der University of Oxford und leitet dort das Labor für Radiokarbondatierung. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Datierung mittel- und jungpaläolithischer Knochen aus Eurasien. **Katerina Douka** ist promovierte Archäologin am Max-Planck-Institut für Menschheitsgeschichte in Jena. Mit ihrer Forschergruppe durchsucht sie nicht identifizierte Knochenfragmente aus verschiedenen Fundorten Asiens nach fossilen Überresten von Neandertalern und Denisova-Menschen.

spektrum.de/artikel/1647838

AUF EINEN BLICK
WER DEN SPLITTER NICHT EHRT …

1 Während des Mittel- und Jungpaläolithikums teilten sich *Homo sapiens*, Neandertaler und Denisova-Menschen eine Zeit lang ihren Lebensraum.

2 Fossilien aus dieser Epoche sind selten und oft zu klein, um genauer bestimmt zu werden. Art und Ausmaß der Interaktionen zwischen den verschiedenen Menschengruppen bleiben daher oft rätselhaft.

3 Forscher ziehen nun aber auch aus winzigsten Knochenfragmenten erstaunliche Erkenntnisse über diese menschliche Frühzeit – anhand charakteristischer Kollagensignaturen.

Mit ZooMS (Zooarchäologie durch Massenspektrometrie) konnte dieses fossile Knochenfragment aus der Denisova-Höhle in Südsibirien als Teil eines Hominiden – eines Mitglieds der Gruppe der Menschenaffen einschließlich des Menschen – identifiziert werden.



CHRISTOFFER RUDQUIST

Elf Stunden dauert die Fahrt von Nowosibirsk zu einem der wohl aufregendsten archäologischen Fundorte der letzten Jahre. Der Weg führt über holprige Straßen Richtung Südosten durch die weite Ebene der südsibirischen Steppe, bis sich schließlich die Ausläufer des Altai-Gebirges vor uns erheben. Schluchten, reißende Gebirgsbäche und idyllische Holzhäuser prägen die Landschaft; Adler schweben über uns hinweg. Hoch über dem Fluss Anui, hinter der Kurve eines Feldwegs, taucht sie plötzlich auf: die Denisova-Höhle – und alle Gedanken an die lange, strapaziöse Reise verfliegen. Genau dort entdeckten Archäologen vor rund zehn Jahren die Überreste einer bis dahin unbekannten Menschenart und veränderten damit grundlegend unsere Vorstellung von der menschlichen Frühzeit.

Nachdem unsere Spezies, der *Homo sapiens*, vor Hunderttausenden von Jahren in Afrika auftauchte, breitete sie sich allmählich nach Europa und Asien aus. Dort begegnete sie anderen Menschenformen wie den Neandertalern, mit denen sie sich jahrtausendelang ihren Lebensraum teilte, bevor diese schließlich verschwanden. Inzwischen wissen wir, dass die verschiedenen Menschengruppen nicht nur nebeneinander hergelebt hatten. Sie zeugten sogar Nachwuchs miteinander. Noch heute tragen wir Menschen die DNA unserer ausgestorbenen Verwandten in uns.

Wann und wo genau sich unsere Vorfahren getroffen haben, wie oft sie sich vermischt haben und wie sie sich gegenseitig kulturell beeinflussten, ist allerdings immer noch ein Rätsel. Leider kennen wir bisher noch zu wenige Fundplätze aus jener Zeit, und oft bargen diese lediglich Steinwerkzeuge und andere Artefakte. Menschliche Fossilien, die vollständig genug wären, um sie sicher einer bestimmten Menschenart zuordnen zu können, fehlen hingegen fast immer. Und so lässt sich nur selten feststellen, welche Spezies die Geräte hergestellt hat, die man aus jener Übergangszeit kennt, und wie diese genau zu datieren sind.

Der Zoo im Massenspektrometer

Eine viel versprechende neue Technik könnte diese Fragen endlich beantworten. Mit »Zooarchäologie durch Massenspektrometrie« (ZooMS), auch Kollagen-Peptidmassen-Fingerprinting genannt, lässt sich bestimmen, von welcher Art Lebewesen ein unbekanntes Knochenfragment stammt (siehe »Zu wem gehört der Knochen?«, S. 38). Das Protein Kollagen ist am Aufbau von Knochen, Haaren und Nägeln beteiligt, und seine charakteristische Zusammensetzung liefert nach enzymatischer Spaltung in kleinere Peptide einen eindeutigen molekularen Fingerabdruck (englisch: fingerprint). Selbst kleine Knochenfragmente, die optisch keine typischen Kennzeichen ihrer Gattung oder Art erkennen lassen, können auf diese Weise klassifiziert werden.

Durch die Analyse des Kollagens können wir also aus einem Berg gleich aussehender kleiner Knochenfragmente jene herausfinden, die von einem Vertreter der so genannten Hominiden, also der Menschenaffen einschließlich der Menschen stammen. Einmal als Überrest eines Primaten identifiziert, lässt sich nun gezielt nach DNA suchen, um zu klären, ob der fragliche Knochen zu einem Neandertaler, einem anatomisch modernen Menschen oder einer anderen menschlichen Spezies gehörte. Einen solchen Knochen

können wir außerdem direkt datieren. Für die Altersbestimmung muss jedoch ein Teil des Knochens zerstört werden. Museumskuratoren geben daher meist nur ungern vollständige Skelettteile aus ihren Sammlungen für eine solche Analyse her. Weniger Bedenken haben sie bei ohnehin schon stark fragmentierten Stücken. Durch sie lassen sich jene Fundorte genauer untersuchen, an denen einst verschiedene Menschenarten gleichzeitig lebten – vor allem, wenn neben den Knochen dort auch Artefakte zu Tage gekommen sind.

Etliche Forscher interpretieren insbesondere symbolische Objekte oder frühe Kunstwerke als Ausdruck der einzigartigen kognitiven Fähigkeiten des anatomisch modernen Menschen. Andere wiederum trauen den Neandertalern durchaus zu, ebenfalls derartige Gegenstände hergestellt zu haben – vielleicht sogar nach ihren eigenen Traditionen. Einige ihrer Kenntnisse könnten diese Urmenschen möglicherweise auch an *Homo sapiens* weitergegeben haben. Fossile Fragmente, die gemeinsam mit solchen kunstvollen Artefakten gefunden wurden, taxonomisch zu bestimmen und zu datieren, könnte in dieser Debatte für mehr Klarheit sorgen.

Bereits seit den 1980er Jahren graben russische Archäologen in der Denisova-Höhle. Doch erst 2010 erlangte die Fundstelle weltweite Berühmtheit. In diesem Jahr veröffentlichten Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig die Ergebnisse von Genanalysen, die sie an einem Fingerknochenfragment durchgeführt hatten, das zwei Jahre zuvor in der Höhle gefunden worden war. Der kleine Knochen wirkte zunächst unscheinbar; umso spektakulärer war, was in ihm steckte: der genetische Nachweis einer bisher völlig unbekannten Menschenform – die genauso eng mit dem Neandertaler verwandt war wie wir. Der Knochen gehörte zu einem jungen Mädchen, das die Paläoanthropologen zunächst »X-Woman« tauften und das einer Population angehörte, die man heute unter dem Namen Denisova-Menschen kennt. Seither tauchten noch etwa eine Hand voll weiterer Urmenschenknochen und -zähne in der Höhle auf, sowohl von Neandertalern als auch von Denisovanern.

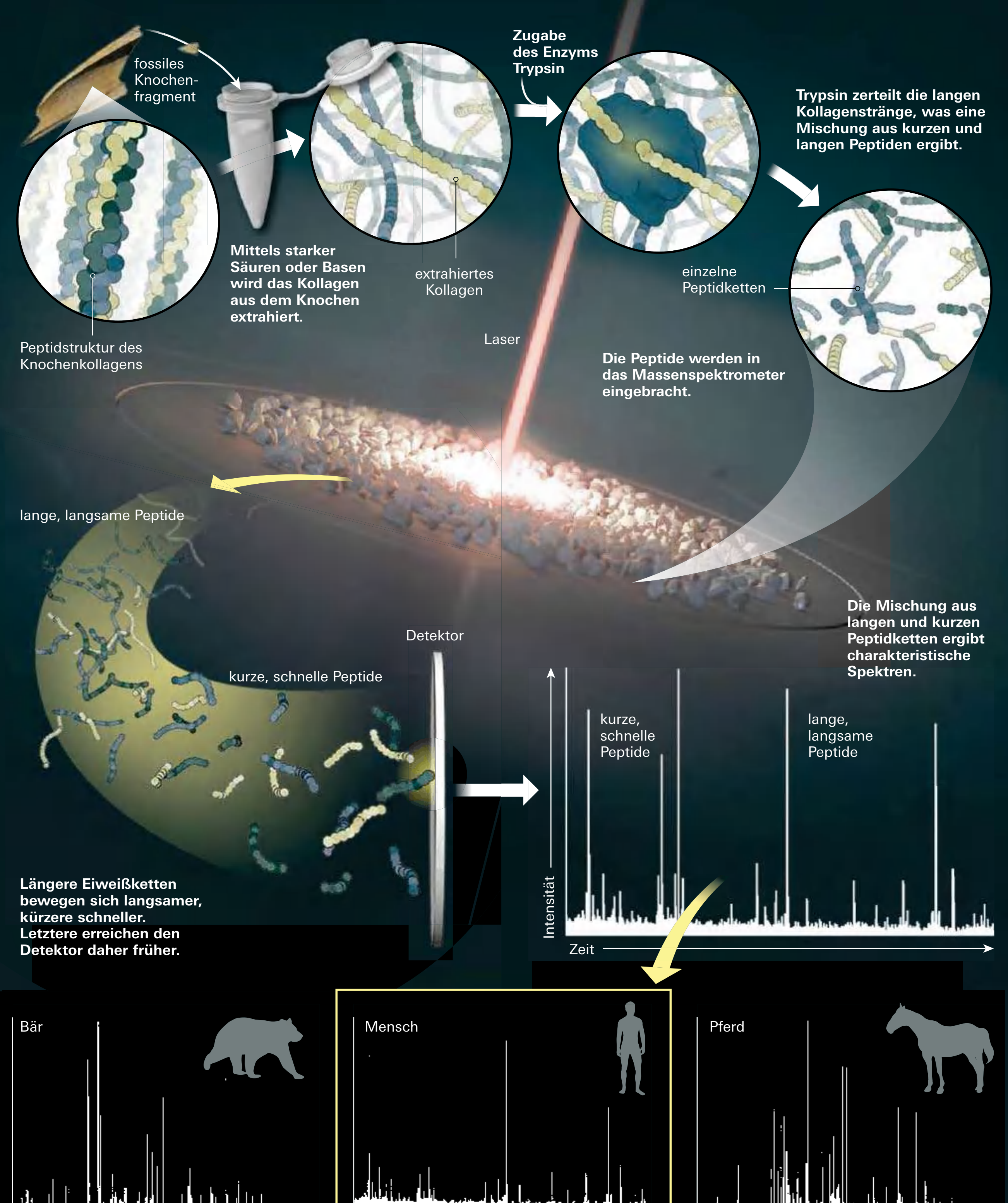
Solche ungeahnten Einblicke in die Frühzeit der Menschheitsgeschichte verdanken Urgeschichtler modernen genetischen Methoden. Die Entschlüsselung alter DNA lieferte dabei nicht nur den Nachweis bis dahin unbekannter Menschenformen, sondern zusätzlich darüber, wie diese mit den anatomisch modernen Menschen interagierten. So

Michael Schunkow (vorne links), Maxim Koslikin (vorne rechts) und Vladimir Vanejew (hinten rechts) von der Russischen Akademie der Wissenschaften untersuchen gemeinsam mit den Autoren Katerina Douka (hinten links) und Thomas Higham (hinten Mitte) die archäologischen Schichten in der Denisova-Höhle, bevor sie Proben für die ZooMS-Analyse und die Radiokarbondatierung auswählen.


SERGEY ZELINSKI, RUSSISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

Zu wem gehört der Knochen?

Mit ZooMS, auch bekannt als Kollagen-Peptidmassen-Fingerprinting, können Forscher sonst nicht identifizierbare Knochenfragmente taxonomisch bestimmen. Dazu werden die im Knochen konservierten Kollagenproteine in einem Massenspektrometer analysiert. Zunächst zerschneidet das Enzym Trypsin das Kollagen in kleinere Peptidketten. Ein Laser ionisiert diese Bausteine, so dass sie durch die elektromagnetischen Felder des Massenspektrometers zum Detektor beschleunigt werden. Je kürzer und damit leichter die geladenen Peptidketten sind, desto schneller erreichen sie den Detektor. Die verschieden langen Moleküle werden nacheinander gemessen und ergeben ein charakteristisches Spektrum (»fingerprint«). Anhand einer Bibliothek von Peptidsignaturen bekannter Tierarten lassen sich die Messergebnisse einer bestimmten Tiergruppe zuzuordnen.



wissen wir mittlerweile, dass sich Neandertaler und *Homo sapiens* in den letzten 10 000 Jahren mindestens dreimal gekreuzt haben. Und auch die Denisovaner zeugten Nachwuchs mit diesen zwei Menschenformen, mit denen sie sich den Lebensraum teilten. Die lange vertretene Meinung, der anatomisch moderne Mensch hätte bei seinem Auszug aus Afrika die archaischen Populationen Eurasiens einfach ausgelöscht und rasch ersetzt, muss folglich einem komplexeren Szenario von Vermischung und Genfluss weichen.

Die meisten Fossilien aus der Denisova-Höhle sind aber so unvollständig, dass wir menschliche Überreste mit bloßem Auge nicht erkennen können. Außerdem ist der Fundplatz bis heute überaus schwierig zu datieren. Seit mittlerweile sechs Jahren wirken wir am Denisova-Projekt als Experten für Radiokarbondatierung mit. Physikalische Altersbestimmungen sind vor allem für Material aus dem Mittel- und Jungpaläolithikum (von vor rund 250 000 bis vor 40 000 beziehungsweise vor 40 000 bis 10 000 Jahren) wichtig, denn die Geräte, etwa Faustkeile, aus diesen Epochen zeigen keine charakteristischen Formen, die Archäologen mit bestimmten Zeiträumen verbinden könnten. Mit der C14-Methode versuchen wir, für die jüngere Zeitspanne eine belastbare Chronologie der Denisova-Höhle und weiterer paläolithischer Orte in Eurasien zu erstellen.

Seit 2008 wurden an dem sibirischen Fundplatz mehr als 13 000 Knochen ausgegraben. 95 Prozent können taxonomisch nicht bestimmt werden, weil sie zu stark fragmentiert sind. Und auch alle identifizierten Urmenschenreste aus der Höhle sind winzig – in der Regel kürzer als zwei Zentimeter. Der Fingerknochen von »X-Woman« beispielsweise hatte nur die Größe einer Linse und wog weniger als 40 Milligramm. Auch die meisten anderen Knochen waren zerbrochen, vermutlich weil Raubtiere wie Hyänen im Lauf der Zeit ebenfalls in der Höhle Schutz gesucht hatten, wo sie ihre Jungen mit Knochen gefüttert haben.

Wie könnten wir also in diesen tausenden Knochenfragmenten mehr menschliche Überreste finden? Welche weiteren genetischen und chronologischen Informationen liegen darin wohl noch verborgen? Vielleicht schlummert hier sogar eine weitere unentdeckte Urmenschenart? Uns wurde klar, dass die ZooMS für ein solches Screening die Methode der Wahl ist. Denn Biomoleküle bleiben auf Grund der stabilen und sehr niedrigen Durchschnittstemperatur in der sibirischen Höhle von zirka sechs Grad Celsius erstaunlich gut erhalten – selbst alte DNA. So stammen die beiden vollständigsten Genome unserer Vorfahren, die bisher sequenziert wurden, von Fossilien aus der Denisova-Höhle.

ZooMS wurde ursprünglich von Michael Buckley, heute an der University of Manchester, und Matthew Collins von der University of York entwickelt. Mit der Methode identifizieren Forscher seit mehr als einem Jahrzehnt Tierknochen aus archäologischen Fundstätten. Sie ist mit umgerechnet etwa 5 bis 10 Euro für eine Analyse relativ preiswert, und man benötigt nur 10 bis 20 Milligramm Probenmaterial. Pro Woche kann ein einziger Wissenschaftler Hunderte von Knochen auf diese Weise untersuchen.

So witterten wir eine große Chance: Wenn unter den Fragmenten aus der Denisova-Höhle weitere Reste von Urmenschen verborgen lagen, sollten wir sie finden können. Soweit wir wissen, hat bisher noch niemand ZooMS verwendet, um nach menschlichen Knochen zu suchen. Zwar lässt sich mit dieser Methode wohl nicht zwischen Menschen und Menschenaffen unterscheiden, weil sich deren Peptidsignaturen zu stark ähneln. Wir können allerdings ausschließen, dass etwa Schimpansen oder Orang-Utans während des Paläolithikums dort lebten. Wenn es uns also gelingen sollte, ein Knochenstück einem Hominiden zuzuordnen, sollte dieser menschlich sein. Die genetische Analyse kann die genaue Artbestimmung klären.

Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig und seine Arbeitsgruppe hatten 2010 das Genom von »X-Woman« veröffentlicht, und wir waren gespannt, was der Experte für alte DNA von unserer Idee hielt. Er war sofort begeistert und sicherte uns seine Unterstützung zu. Auch Anatoli Derewjanko von der Russischen Akademie der Wissenschaften, der die Arbeit in der Denisova-Höhle koordiniert, und Michail Schunkow, den Leiter der Ausgrabungen, konnten wir überzeugen. Und so begannen wir einige Monate später, Proben von rund 3000 Fragmenten vermeintlich »wertloser« Knochen zu nehmen.

Versteckt zwischen Mammuts und Wollnashörnern

Theoretisch, so dachten wir, sollte die Arbeit schnell erledigt sein. In Wirklichkeit standen wir aber vor einer riesigen Aufgabe: Aus jedem Fragment mussten wir ein winziges Knochenstück zur Analyse entfernen und dabei penibel darauf achten, diese potenziell wertvollen Proben nicht zu verunreinigen. Eine unserer Studentinnen, Samantha Brown, verbrachte damit unzählige Stunden im Labor der University of Oxford.

Die Analyseergebnisse der ersten 700 bis 800 Knochenproben waren zwar interessant: Wir hatten Mammuts, Hyänen, Pferde, Rentiere, Wollnashörner – die gesamte Palette eiszeitlicher Tiere, aber leider keine Spur menschlicher Existenz. Trotz der Enttäuschung suchten wir weiter. Und tatsächlich erhielten wir eines Abends im Sommer 2015 eine E-Mail von Michael Buckley, dem ZooMS-Erfinder, der ebenfalls mit uns zusammenarbeitet. Eine unserer Proben, DC1227, zeigte die charakteristischen Peptidmarker eines Hominiden. Wir hatten also die sprichwörtliche Nadel im Heuhaufen gefunden!

Am nächsten Tag sahen wir uns im Oxforder Labor den Knochen an. Ernüchtert mussten wir feststellen, dass das Fragment nur 25 Millimeter lang und damit selbst für Denisova-Verhältnisse winzig war. Viele Möglichkeiten für weitere Analysen blieben uns nicht. Aber angesichts der außergewöhnlichen Erhaltungsbedingungen hofften wir, dass die Menge ausreichen würde, um mit unseren Methoden noch einiges über den Knochen herauszufinden. Wir machten hoch aufgelöste Fotos, schickten den Knochen durch einen CT-Scanner und entnahmen zusätzliche Proben für die Datierung und Isotopenanalyse. Danach sandte Brown den Rest nach Leipzig zur DNA-Analyse in Pääbos Labor.

Einige Wochen später erhielten wir die Ergebnisse der Radiokarbondatierung. Das Fehlen von radioaktivem Kohlenstoff in der Probe bedeutete, dass unser kleiner Knochen


CHRISTOFFER RUDQUIST

Um fossile Knochen mit ZooMS analysieren zu können, schleifen die Forscher eine etwa 20 Milligramm schwere Probe ab.



CHRISTOFFER RUDQUIST

Auch für die Radiokarbondatierung muss ein Teil des Knochens zerstört werden. Von den häufig kleinen Splittern bleibt nach ihrer Untersuchung oft nur wenig übrig.

mehr als 50000 Jahre alt war. Auch die Ergebnisse der DNA-Analyse ließen nicht lange auf sich warten: Die mitochondriale DNA – jener Teil des Erbguts, der nur über die mütterliche Linie weitergegeben wird – ließ darauf schließen, dass die Mutter des Individuums, von dem der Knochen stammte, eine Neandertalerin war. Damit war es uns gelungen, einen Urmenschenknochen aufzuspüren, der sich zwischen unzähligen Überresten anderer Spezies versteckt hatte. Nach den ersten Erbgutanalysen wollte Pääbos Team nun versuchen, die viel informativere Kern-DNA aus dem Knochen zu extrahieren, der jetzt die Bezeichnung »Denisova 11« erhielt. In der Zwischenzeit entschieden wir, unsere Methode an weiterem Material zu testen.

Die Vindija-Höhle in Kroatien gilt als einer der wichtigsten Fundorte, um das Leben der späten Neandertaler und ihr Miteinander mit anatomisch modernen Menschen in Europa zu verstehen. Hier wollten wir ZooMS einsetzen, um einen besseren Überblick über die bislang nicht identifizierten Knochen des Fundplatzes zu erhalten.

Bisherige taxonomische Untersuchungen zeigten, dass etwa 95 Prozent der besser erhaltenen Knochen aus der Höhle von Höhlenbären stammen. Als unsere Studentin Cara Kubiak mit ihren Analysen begann, erwarteten wir daher kaum, eine ebenso vielfältige Fauna vorzufinden, wie wir sie in der Denisova-Höhle entdeckt hatten. Umso erstaunlicher war es, als sich schon in der 28. Probe von insgesamt 350 die Peptidsequenz eines Hominiden nachweisen ließ. Der etwa sieben Zentimeter lange Knochen zeigte zudem auffällige Schnittspuren und weitere Anzeichen menschlicher Bearbeitung, wie man sie bereits von anderen Neandertalerknochen kennt. Vermutlich stammen sie vom absichtlichen Zerteilen der Leiche; sie könnten sogar Spuren von Kannibalismus sein. Bald darauf bestätigte Pääbos Team, dass es sich tatsächlich um einen Neandertaler gehandelt hatte.

Das Exemplar mit der Analysennummer Vi-*28 sollte sich als wichtiger Fund bei der chronologischen Neubewertung der Höhle und der Geschichte der Neandertaler herausstellen. Bis dahin legten Radiokarbondaten nahe, dass die Frühmenschen bis vor zirka 30000 Jahren dort lebten und sich somit eine unerwartet lange Zeit ihren Lebensraum mit anatomisch modernen Menschen teilten. Diese wanderten spätestens vor 42000 bis 45000 Jahren in die Region ein. Vindija galt daher als Refugium einer der letzten Neandertaler-Gruppen, die in der Höhle Zuflucht fanden und dort noch erstaunlich lange überleben konnten, während ihre Artgenossen fast überall im restlichen Europa längst Geschichte waren.

Diese Datierungen der menschlichen Überreste aus Vindija sind allerdings umstritten. Archäologen und Präparatoren hatten die Knochen in der Vergangenheit mit Konservierungsmitteln behandelt, die unter anderem Kohlenstoff enthielten, der in die Knochen eindrang und so die Isotopenverhältnisse für eine Radiokarbondatierung verfälschte. Glücklicherweise hatte man Vi-*28 irrtümlich

für einen Tierknochen gehalten und daher nicht konserviert. Wir konnten sein Alter darum noch sehr genau bestimmen: Der Neandertaler, zu dem dieser Knochen gehörte, lebte vor etwa 47000 Jahren und damit über 15000 Jahre früher an diesem Fundplatz, als man ursprünglich angenommen hatte.

Wir entschieden uns daher, auch die bereits datierten Neandertalerknochen aus der Vindija-Höhle erneut zu untersuchen. Das Ergebnis bestätigte, dass die haltbar gemachten Knochen falsche Ergebnisse geliefert hatten: Sie sind unseren Messungen zufolge ebenfalls mehr als 40000 Jahre alt, so wie auch alle weiteren Proben der Frühmenschen von diesem Fundort, die bis jetzt datiert werden konnten. Die Neandertaler scheinen wohl doch weit früher als vermutet aus Vindija verschwunden zu sein – vielleicht sogar noch, bevor die ersten anatomisch modernen Menschen dort ankamen.

Sonderbare Mischung:
Mutter Neandertalerin – Vater Denisovaner

Mittlerweile haben auch andere Forschergruppen mit der Technik große Erfolge erzielt. 2016 berichteten Frido Welker, heute am dänischen Naturkundemuseum in Kopenhagen, und seine Kollegen, dass sie mit der Methode von bis dahin nicht identifizierten Knochenfragmenten aus der Grotte du Renne in Burgund 28 als menschlich einordnen konnten. Vor Jahrzehnten fanden Forscher dort Neandertalerknochen zusammen mit einer Reihe überraschend komplexer Artefakte, darunter Knochenwerkzeuge, Anhänger und anderen Körperschmuck – Elemente der so genannten Châtelperronien-Kultur am Übergang zwischen Mittel- und Jungpaläolithikum.

Diese Entdeckung stand im krassen Widerspruch zu der bis dahin vertretenen Vorstellung, *Homo sapiens* allein sei zu einem solchen technischen und künstlerischen Einfallsreichtum fähig. Und so begann eine bis heute andauernde Debatte darüber, ob wirklich Neandertaler mit den fortschrittlichen Artefakten in Verbindung gebracht werden können.

Gegner dieser Theorie erwiderten, dass vermutlich die archäologischen Schichten am Fundplatz gestört worden waren. Ältere Neandertalerknochen seien dabei mit jüngeren Artefakten des *Homo sapiens* vermischt worden. Die 28 Knochenfragmente, die Welker und seine Kollegen mit ZooMS als menschlich identifizierten, hatten aber eindeutig in derselben Schicht gelegen wie die fortschrittlichen Werkzeuge und Schmuckgegenstände. Ebenso eindeutig waren die DNA-Ergebnisse: Die Knochen stammen von Neandertalern. Das spricht klar dafür, dass die Urmenschen Châtelperronien- sowie andere komplexe Techniken beherrschten und sich künstlerisch betätigten. Sie waren offenbar intelligenter, als man es ihnen bisher zugetraut hatte.

Während unserer Arbeit an den Vindija-Knochen gingen die Untersuchungen an den Proben aus der Denisova-Höhle weiter. Wir hofften darauf, noch mehr menschliche Fossilien zu finden. Und wir hatten Glück: Es kamen die Reste zweier weiterer Urmenschen ans Licht: DC3573, ein über 50000 Jahre altes Fragment eines Neandertalers, und DC3758, ein etwa 46000 Jahre alter Knochen, der keine DNA mehr enthielt. Es ist uns gelungen, unter mehr als 5000 Knochenfragmenten insgesamt fünf menschliche Knochen zu finden, die ohne ZooMS wohl für immer in Vergessenheit geraten wären.

Die aufregendste Entdeckung stand uns jedoch noch bevor. Im Mai 2017 trafen wir uns mit Matthias Meyer und Janet Kelso von Pääbos Labor in Leipzig. Wir wollten von ihnen wissen, ob sie es geschafft hatten, die Kern-DNA der Probe »Denisova 11« zu sequenzieren. Es kommt nicht oft vor, dass man in der Wissenschaft völlig unerwartete Nachrichten erhält. Aber Meyer und Kelso lieferten genau das. Die Kern-DNA, sagten sie, sei eigenartig gespalten. Eine Hälfte passe zu einem Neandertaler, die andere schien von einem Denisova-Menschen zu stammen. Um wirklich sicherzugehen, wollten sie die Proben noch einmal analysieren. Nach einigen Monaten hatten wir Gewissheit: Ihr Ergebnis war korrekt. Die mitochondriale DNA hatte uns nur die Hälfte des Bildes gezeigt. Was wir gefunden hatten, war kein Neandertaler, sondern ein Nachkomme einer Neandertaler-Mutter und eines Denisovaner-Vaters – eine Hybride der ersten Generation, wie Genetiker sagen.

Durch die Genanalyse wissen wir auch, dass »Denisova 11« eine Frau war, die vor ungefähr 90000 bis 100000 Jahren lebte. Ein CT-Scan ermöglichte es, die Knochendichte zu bestimmen. Daran konnte der Anthropologe Bence Viola von der University of Toronto erkennen, dass sie mindestens 13 Jahre alt war, als sie starb. In ihrem Erbgut zeigte sich außerdem, dass ihr Denisovaner-Vater vermutlich ebenfalls einen Neandertaler als entfernten Verwandten hatte – mehrere hundert Generationen zurück.

Wir werden wohl nie erfahren, wie solche Vermischungen in der Vorgeschichte zu Stande kamen. Wir wissen nur, dass sie passierten. Ebenso wenig können wir feststellen, woran »Denisova 11« gestorben ist. Möglicherweise hat ein Raubtier, vielleicht eine Hyäne, ihre Überreste in die Höhle geschleppt und sich daran gütlich getan. Ob das Mädchen zuvor von seinen Angehörigen feierlich bestattet wurde oder ob es dem wilden Tier zum Opfer fiel, bleibt aber ungewiss.

Seit fast 100000 Jahren lag dieses winzige Stückchen ihres Körpers ungestört in der Höhle und hätte noch viele Jahre dort verborgen bleiben können. Doch dank moderner wissenschaftlicher Methoden konnten wir dem Knochen wieder Leben einhauchen und ihm einen spannenden Teil seiner Geschichte entlocken. ◂

QUELLEN

Brown, S. et al.: Identification of a new hominin bone from Denisova Cave, Siberia using collagen fingerprinting and mitochondrial DNA analysis. Scientific Reports 6, 2016

Devièse, T. et al.: Direct dating of neanderthal remains from the site of Vindija Cave and implications for the middle to upper paleolithic transition. PNAS 114, 2017

Slon, V. et al.: The genome of the offspring of a neanderthal mother and a denisovan father. Nature 561, 2018

Welker, F. et al.: Palaeoproteomic evidence identifies archaic hominins associated with the Châtelperronian at the Grotte du Renne. PNAS 113, 2016

ASTRONOMIE

INS HERZ DER FINSTERNIS

Lange waren Schwarze Löcher etwas, was man nur mit Formeln begreifbar machen konnte. Nun haben Astrophysiker eines der Massemonster mit Teleskopen abgelichtet. Ein Bild für die Geschichtsbücher – und der vorläufige Höhepunkt einer langen Reise.



Robert Gast ist Physiker und Redakteur bei **Spektrum**.

spektrum.de/artikel/1647844

Am Ende ist das Wetter so gnädig wie seit Jahren nicht mehr. Überall ist die Sicht klar: in der marshaften Einöde der chilenischen Anden, auf dem Gipfel eines erloschenen mexikanischen Vulkans, an einem überwachsenen Bergkamm in Arizona, in der spanischen Sierra Nevada, auf dem Mauna Kea in Hawaii und am Südpol. Erst zögern die Wissenschaftler noch, dann gibt einer von ihnen das Startsignal – und an jedem der Standorte schwenken haushohe Teleskopschüsseln in Position.

Eines ihrer Ziele an diesem Apriltag des Jahres 2017: ein aberwitzig kleiner Fleck im Sternbild Schütze. Astronomen vermuten dort, im 26000 Lichtjahre entfernten Mittelpunkt unserer Galaxie, seit Langem ein Schwarzes Loch namens Sagittarius A*. Schätzungen zufolge ist es 4,3 Millionen Mal so schwer wie unsere Sonne. Es ist der Ort, um den sich die spiralförmigen Arme der Milchstraße drehen. Zugleich ist es ein Symbol für die Grenze des Wissens unserer Zivilisation: Noch nie haben Menschen ein Schwarzes Loch gesehen. Bisher konnten sie immer nur indirekt auf die Existenz der bizarren Objekte schließen.

Über Stunden behalten die rund um den Globus verteilten Parabolantennen die Region im Blick. Immer wieder spähen sie auch ins Zentrum einer anderen Galaxie namens M87, die im Sternbild Jungfrau am Nachthimmel steht und

Diese Aufnahme des Event Horizon Telescope ging um die Welt: Sie zeigt einen leuchtenden Ring aus heißer Materie, der das Schwarze Loch im Zentrum der Galaxie M87 umgibt. Das Bild ist das Resultat einer Rekonstruktion von Messdaten, die acht Observatorien im April 2017 gesammelt hatten.

AUF EINEN BLICK
DER SCHATTEN DES MONSTERS

1 Durch einen Zusammenschluss von acht Radioteleskop-Observatorien haben Astrophysiker erstmals die Umrisse eines supermassereichen Schwarzen Lochs »fotografiert«.

2 Die Aufnahme zeigt das Exemplar im Herzen der 55 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie M87, das so schwer ist wie 6,5 Milliarden Sonnen.

3 Astrophysiker in aller Welt haben zwei Jahrzehnte auf das Bild hingearbeitet – dabei sah es immer wieder so aus, als könnte das Projekt scheitern.

in deren Herzen sich ein noch viel gewaltigeres Schwarzes Loch versteckt halten soll.

Fünf Tage dauert die Beobachtung durch den Teleskopverbund, den die Wissenschaftler Event Horizon Telescope (EHT) getauft haben. 3300 Terabyte an Daten zeichnen die acht Observatorien in dieser Zeit auf – viel zu viel, um sie per Internet zu übertragen. Also packen die Forscher rund 1000 Festplatten in gepolsterte Boxen und lassen sie nach Boston und Bonn fliegen, zur Auswertung.

Zwei Jahre später, am 10. April 2019, gibt es endlich ein Ergebnis: Auf nicht weniger als sechs Pressekonferenzen hat das internationale Team aus gut 200 Wissenschaftlern eine Aufnahme des EHT präsentiert. Es zeigt nur einen verwaschenen roten Ring vor dunklem Hintergrund (siehe Aufnahme S. 42/43). Aber die Forscher sind sich sicher: Hier ist das Schwarze Loch im Zentrum der fernen Galaxie M87 zu sehen – oder besser gesagt seine Umrisse.

So ikonisch wie der »Pale Blue Dot«

Für manchen Forscher ist es eine Aufnahme, die man in eine Reihe mit dem ikonischen »Pale Blue Dot« aus dem Jahr 1990 stellen sollte. Das Bild zeigte die Erde als winzigen blauen Punkt in den Weiten des Alls, aufgenommen von der Raumsonde Voyager 1. Schaut, wie zerbrechlich unsere Heimat ist, schien das Foto zu sagen. Die Aufnahme des Event Horizon Telescope hat eine ähnlich gewichtige Botschaft. Doch statt einer Oase des Lebens zeigt sie einen Ort größtmöglicher Vernichtung. Es ist gewissermaßen das Gegenteil der stabilen Biosphäre, die wir auf der Erde für selbstverständlich nehmen.

Dafür spricht jedenfalls alles, was Wissenschaftler über Schwarze Löcher wissen. Das Exemplar im Zentrum von M87 bringt unvorstellbare 13 000 Billionen Billionen Billionen Kilogramm auf die Waage (eine Zahl mit 41 Stellen), so viel wie 6,5 Milliarden Sonnen. Die gewaltige Schwerkraft des Objekts zwingt sämtliche Materie im Umfeld in eine brodelnde, rasant rotierende Scheibe. An den Polen des Schwarzen Lochs setzt außerdem das ein, was Astrophysiker einen Jet nennen – ein Strahl aus sengendem Plasma, der Teilchen tausende Lichtjahre weit ins All schleudert.

Wie schwierig es war, dieses Inferno abzubilden, erzählten die beteiligten Wissenschaftler auf der Brüsseler Pressekonferenz. Am Nachthimmel hat der leuchtende Kranz um das Schwarze Loch von M87 gerade mal eine Ausdehnung von 42 millionstel Bogensekunden. Das Vorhaben glich damit dem Versuch, eine Orange auf dem Mond abzubilden.

Um die nötige Auflösung zu erreichen, war der Zusammenschluss der acht rund um den Globus verteilten Observatorien nötig. Gemeinsam bildeten die Radioteleskope ein »virtuelles« Teleskop von der Größe der Erde. »Im Team haben wir ein viel besseres Ergebnis erzielt, als wir es allein je hinbekommen hätten«, sagte EHT-Forscher Anton Zensus, Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie.

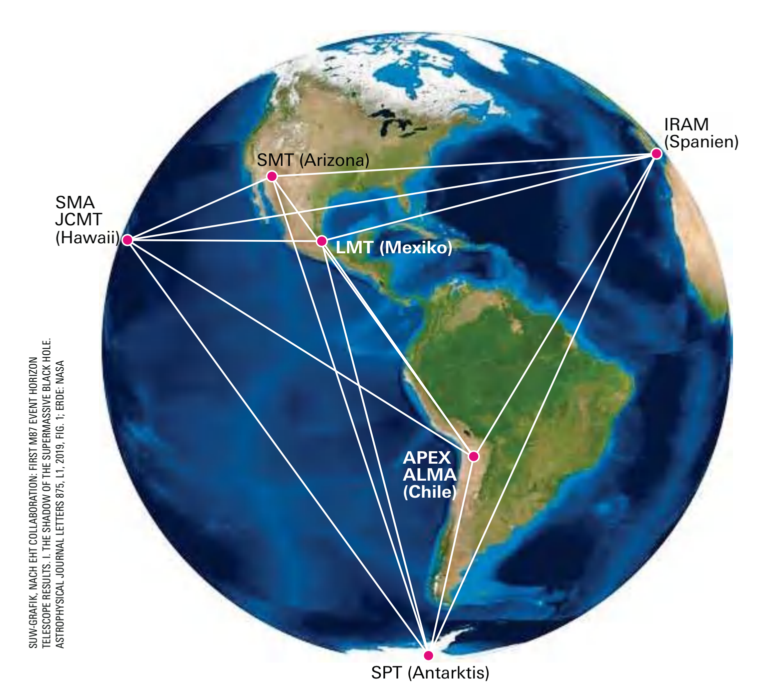
In einer Hinsicht blieben die präsentierten Ergebnisse allerdings hinter den Erwartungen zurück: Eigentlich wollten die Wissenschaftler ja nicht nur das supermassereiche Schwarze Loch im Zentrum der Galaxie M87 abbilden, sondern auch das Exemplar im Herzen der Milchstraße. Noch ist unklar, ob die Daten von 2017 dafür ausreichen.

Das ruft in Erinnerung, wie nah Erfolg und Scheitern beim Event Horizon Telescope stets beisammenlagen. Von Anfang an war es Wissenschaft an der Grenze des technisch Machbaren, und für die Radioastronomen war es so etwas wie die Erstbesteigung des Mount Everest. Mehrfach wäre das Projekt fast gescheitert. Am Ende wurde es nur deshalb ein Erfolg, weil sich die Forscher weder von persönlichen Differenzen noch von politischen Turbulenzen abbringen ließen – und gemeinsam auf das Ziel hinarbeiteten.

Am Anfang dieser Geschichte steht eine Entdeckung aus dem Jahr 1932: Techniker der berühmten Bell Telephone

Auf Bildern des Hubble-Weltraumteleskops erscheint die 55 Millionen Lichtjahre entfernte Galaxie M87 als diffuser Lichthof. Wenn man genau hinsieht, kann man den »Jet« aus heißer Materie erkennen, den das Schwarze Loch im Zentrum tausende Lichtjahre weit ins All feuert.

NASA, ESA, AND THE HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA) (HUBBLESITE.ORG/IMAGE/2391/NEWS_RELEASE/2008-30)



SUW-GRAFIK, NACH EHT COLLABORATION: FIRST M87 EVENT HORIZON TELESCOPE RESULTS. I. THE SHADOW OF THE SUPERMASSIVE BLACK HOLE. ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS 875, L1, 2019, FIG. 1; ERDE: NASA

Die Observatorien des Event Horizon Telescope im Jahr 2017: das James Clerk Maxwell Telescope und das Submillimeter Array auf Hawaii, das Submillimeter Telescope in Arizona, das Large Millimeter Telescope in Mexiko, APEX und ALMA in Chile, das South Pole Telescope am Südpol und das 30-Meter-Teleskop des IRAM-Observatoriums in Spanien.

Laboratories im US-Bundesstaat New Jersey wollten damals Funksprüche per Kurzwelle über den Atlantik senden. Auf der Suche nach möglichen Störquellen stieß der Physiker Karl Jansky auf ein rätselhaftes Signal, das seinen Ursprung in der Mitte der Milchstraße zu haben schien. Das war nicht die einzige mysteriöse Strahlungsquelle am Nachthimmel: Nach dem Zweiten Weltkrieg entdeckten ehemalige Militärfunker um den Briten John Gatenby Bolton weitere Regionen am Firmament, aus denen extrem schwache, aber klar nachweisbare Radiowellen zur Erde drangen.

Erst in den 1960er Jahren lokalisierten Astronomen den genauen Ursprung der Signale: Sie kamen aus einzelnen, Millionen Lichtjahre entfernten Galaxien, darunter auch M87. In ihnen schien ein gigantisches Feuerwerk im Gang zu sein. Ein Feuerwerk, das das Weltall mit Strahlung flutete. Nur woher nahmen diese »aktiven Galaxienkerne« die nötige Energie? Selbst verschmelzende Atomkerne, wie man sie zu jener Zeit aus Sternen oder Wasserstoffbomben kannte, schienen hierfür nicht auszureichen, bei Weitem nicht.

Nach einigem Grübeln stießen Physiker auf eine andere Möglichkeit: Materie im freien Fall. Rechnungen zeigten, dass ein Objekt, das lange von einem Gravitationsfeld beschleunigt wird, enorme Bewegungsenergie gewinnt. Wird das Objekt dann abrupt abgebremst oder umgelenkt, wandelt es die Energie in Wärme oder Strahlung um. Und wie es der Zufall wollte, diskutierten die Gelehrten Mitte der 1960er Jahre gerade engagiert über etwas, was Materie die nötige Beschleunigung verpassen konnte.

Schwarze Löcher waren zu jener Zeit nicht mehr als eine kuriose Möglichkeit aus Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Schon dem jungen Physiker Karl Schwarzschild war 1915 an der Ostfront des Ersten Weltkriegs aufgefallen, dass manche Lösungen der einsteinschen Feldgleichungen scheinbar widersinnige Ergebnisse lieferten: Für extrem dichte Massehaufen spucken die Gleichungen einen Radius aus, ab dem das Gravitationsfeld gegen unendlich zu streben scheint – als würde man eine Zahl durch null teilen.

Ein Punkt, an dem die Zeit stillsteht

Das konnte nicht sein, fanden Einstein, Schwarzschild und viele andere. Doch in den folgenden Jahrzehnten beschäftigten sich Astrophysiker immer wieder mit der Frage, was mit Sternen passiert, die sämtliche Atomkerne in ihrem Inneren zu schwereren Elementen verschmolzen haben. In den 1930er Jahren kristallisierten sich Antworten heraus: Sterne vom Format unserer Sonne fallen zu einer milchig schimmernden Kugel von der Größe eines Planeten zusammen, einem Weißen Zwerg. Plasmakugeln mit etwas größerer Masse kollabieren dagegen zu einem extrem kompakten Objekt vom Format einer Großstadt, einem Neutronenstern.

Aber was, wenn ein noch schwererer Stern in sich zusammenfällt? Robert Oppenheimer, der spätere Vater des amerikanischen Atombombenprogramms, machte sich dazu kurz vor dem Zweiten Weltkrieg Gedanken. Seinen Rechnungen zufolge konnte nichts und niemand den Kollaps aufhalten – er setzt sich einfach immer weiter fort. Die Materie müsste für alle Ewigkeit auf einen Punkt im Zentrum stürzen, prognostizierte der US-Amerikaner.

Oppenheimer berief sich dabei auf Einsteins Relativitätstheorie: Laut ihr dehnen Massen das Gefüge von Raum und

Radiowellen und Millimeterstrahlung

Das Event Horizon Telescope fängt Strahlung einer Wellenlänge von 1,3 Millimetern auf; das entspricht einer Frequenz von 230 Gigahertz. Für Physiker fällt sie damit gerade noch in den Bereich der Radiowellen, die auch viele Zentimeter, Meter oder Kilometer lang sein können. Bei sichtbarem Licht liegen benachbarte Wellentäler hingegen nur 0,0004 bis 0,0007 Millimeter auseinander. Mit der Wellenlänge verändert sich die Art und Weise, wie Strahlung mit Materie interagiert: Während eine Hauswand oder interstellare Staubwolken sichtbares Licht zurückhalten, kann Millimeterstrahlung beides passieren. Für den Nachweis der Wellen sind jedoch spezielle Parabolantennen nötig. Sie müssen eine besonders glatte Oberfläche aufweisen und sollten sich weit oberhalb des Meeresspiegels befinden, da Millimeterstrahlung von Wasserdampf in der Atmosphäre absorbiert wird.

Zeit wie Kaugummi. Bei sehr großen Massen hat das bizarre Konsequenzen, argumentierte Oppenheimer. Hier ist die Schwerkraft so stark, dass die Zeit praktisch einfriert, zumindest aus der Perspektive eines außen stehenden Beobachters. Für ihn müsste es so wirken, als falle die Materie eines kollabierenden Riesensterns immer weiter auf den Punkt im Zentrum zu, dessen Dichte dadurch ins Unendliche wächst. Für das Umfeld dieser Singularität hätte das extreme Folgen: Sobald etwas einmal den von Schwarzschild berechneten Radius passiert hätte, den so genannten Ereignishorizont, könnte es nicht mehr kehrtmachen, egal, was passiert.

Bis in den 1960er Jahre hielten die meisten Physiker das für einen originellen Gedanken ohne praktische Relevanz. Doch die Entdeckung aktiver Galaxienkerne wie dem in der Galaxie M87 machte die exotischen Gebilde plötzlich zu einer plausiblen Möglichkeit. Unter anderem der umtriebige US-Physiker John Archibald Wheeler setzte sich für Oppenheimers Idee ein – er sollte einige Jahre später auch den Begriff »black hole«, also »Schwarzes Loch« prägen.

Aber gab es die bizarren Objekte wirklich? Von den 1970er Jahren an durchforsteten Astronomen das Weltall nach ihnen. Die Forscher spürten dabei immer mehr ferne Galaxien auf, in deren Kern sich ein unsichtbares Monstrum zu verstecken schien. Bald wurden sie auch in unserer Milchstraße fündig: Im 6000 Lichtjahre entfernten Sternsystem Cygnus X-1 verschlingt ein etwa 15 Sonnenmassen schweres Schwarzes Loch einen Stern, was große Mengen an Röntgenstrahlung freisetzt.

Entdeckungen wie diese legten nahe, dass es die Raumzeit-Löcher in ganz verschiedenen Größen gibt. Kollabierende Sterne mit sehr viel Masse hinterlassen offenbar »stellare« Schwarze Löcher wie das von Cygnus X-1, die allenfalls einige Dutzend Sonnenmassen auf die Waage bringen. Schätzungen zufolge gibt es allein in unserer Galaxie Millionen solcher Objekte. In den allermeisten Fällen emittiert ihr Umfeld allerdings keine Strahlung. Und selbst wenn: Stellare Schwarze Löcher sind viel zu klein, als dass man ihren Umriss auf Teleskopaufnahmen sehen könnte.

Auch die 1974 von Stephen Hawking prognostizierte Strahlung, die von Schwarzen Löchern selbst ausgehen soll, kam nicht für einen Nachweis in Frage. Rechnungen zufolge war sie viel zu schwach, um sie mit Teleskopen aufzufangen. Im Zentrum von Galaxien sah die Sache jedoch anders aus. Hier müssten die extremen Objekte millionen-, wenn nicht sogar milliardenfach mehr Masse haben und entsprechend größer sein, argumentierten Forscher in den 1970er Jahren. Und viele dieser »supermassereichen« Schwarzen Löcher müssten von Millionen Grad heißer Materie umgeben sein. Darunter auch Elektronen, die fast mit Lichtgeschwindigkeit umhergeschleudert werden und dabei große Mengen Strahlung abgeben.


JORDY DAVELAAR ET AL./RADBOUD UNIVERSITY/BLACKHOLECAM (WWW.ESO.ORG/PUBLIC/GERMANY/IMAGES/ESO1907F/) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE)

Simulation des aktiven Galaxienkerns von M87: Das Schwarze Loch in der Mitte ist von einer rotierenden Scheibe aus Gas und Staub umgeben. Senkrecht dazu entweichen zwei Jets aus heißer Materie.

Nach und nach tauchten immer mehr Hinweise auf, dass sich etwas Ähnliches auch im Herzen der Milchstraße abspielt. Das dortige Schwarze Loch war jedoch offensichtlich bei Weitem nicht so aktiv wie das im Kern von M87, dessen Zentrum zwei gewaltige Materiestrahlen ins All feuert (siehe Bild oben). Trotzdem müsste man es aufspüren können, argumentierten Astrophysiker – nicht zuletzt über seine enorme Schwerkraft. Mit der Zeit wurden die innersten Lichtjahre unserer Galaxie zu einer der am besten studierten Regionen der Astronomie. Teleskope spürten dort allerlei exotische Dinge auf: gewaltige Magnetfeldbogen, an denen Elektronen wie an einer Wendeltreppe hinaufklettern. Rasant vorüberziehende Wolken aus heißem Gas. Blaue Riesensterne, die mit tausenden Kilometern pro Sekunde durchs All schießen.

10 000-mal kleiner als das, was das Weltraumteleskop Hubble beobachten kann

Das Schwarze Loch in Sagittarius A* stellte jedoch nur einen winzigen Punkt in diesem Chaos dar. Seine Größe schätzten Forscher damals auf ein Dutzend Millionen Kilometer, das Neunfache des Durchmessers unserer Sonne. Aus heutiger Sicht hatte man die Größe des Schwarzen Lochs damit um 50 Prozent unterschätzt. Und so gingen Experten noch zu Beginn der 1990er Jahre davon aus, dass man das Massemonster mit irdischer Technik schlicht nicht erfassen könnte: In 26 000 Lichtjahren Entfernung würde der Ereignishorizont 10 000-mal kleiner als das erscheinen, was das Hubble-Weltraumteleskop auflösen kann. Das hielt Radioastronomen zwar nicht davon ab, ihre Parabolschüsseln immer wieder gen Sagittarius A* zu richten. Aber alles, was sie sahen, war ein verschwommener Fleck, der allenfalls Rückschlüsse auf die weitläufige Umgebung im galaktischen Zentrum zuließ.


ISTOCK / OORKA

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Mehr dazu finden Sie auf unserer Themenseite unter **spektrum.de/t/schwarze-loecher**

Die Lage ändert sich erst in den 1990er Jahren. Der junge deutsche Astrophysiker Heino Falcke forscht damals am Bonner Max-Planck-Institut für Radioastronomie. Seit seiner Doktorarbeit interessiert er sich brennend für das Schwarze Loch im Zentrum der Milchstraße. Entweicht Radiostrahlung nur in großem Abstand von ihm oder auch in unmittelbarer Nähe? Die unscharfen Messdaten zu dieser Zeit sind mit beiden Szenarien kompatibel. Doch bereits 1992 hat Falcke gemeinsam mit Kollegen ein Modell entwickelt, dem zufolge die Strahlung von knapp oberhalb des Ereignishorizonts kommen müsste, von dort, wo Materie in den Schlund des Monsters rutscht.

Aber kann man das von der Erde aus wirklich beobachten? Genau wie seine Kollegen ist Falcke zunächst pessimistisch. Doch eines Tages blättert er in der Bibliothek des Bonner Max-Planck-Instituts durch einen alten Tagungsband – und stößt per Zufall auf eine Arbeit aus dem Jahr 1973, die bis dahin kaum Beachtung gefunden hat. Der US-Amerikaner James M. Bardeen rechnet darin aus, wie es wirken würde, wenn ein Stern direkt hinter einem Schwarzen Loch stünde. In diesem Fall sähe ein Beobachter den Stern trotzdem, denn Licht kann einen Bogen um das massereiche Objekt machen. Die Umrundung klappt jedoch nur bis zu einem bestimmten Orbit: Fliegt ein Lichtteilchen zu nah am Schwarzen Loch vorbei, wird es auf Bahnen gezogen, die es im Inneren verschwinden lassen.

Auf einer Teleskopaufnahme würde dieser Rand – die Physiker sprechen vom »letzten Photonenorbit« – klar hervortreten. Was die Größe der Struktur anbelangt (Falcke und seine Kollegen werden sie später »Schatten« taufen), kommt Bardeen zu einem überraschend ermutigenden Ergebnis: Der Schatten müsste einen 2,5-mal so großen Durchmesser wie der Ereignishorizont haben, denn das Schwarze Loch verformt die umliegende Raumzeit zu einer Art überdimensionierter Lupe.

»Das war der Aha-Moment«, erinnert sich Falcke. Denn er erkennt, dass die Überlegung seines US-amerikanischen Kollegen auch gelten könnte, wenn ein Schwarzes Loch von heißer Materie umgeben ist. Ein ähnliches Szenario hatte der französische Astronom Jean-Pierre Luminet bereits 1979 durchgespielt. Falcke kennt den Aufsatz nicht, stellt aber auf Basis von Bardeens Abschätzungen fest, dass Sagittarius A* wider Erwarten groß genug wäre für eine Beobachtung von der Erde aus.

Die Rechnungen passen auch gut zu Messdaten aus dem galaktischen Zentrum, die Falckes Kollegen Anton Zensus und Thomas Krichbaum zu dieser Zeit am Bonner Max-Planck-Institut vorstellen. Sie lassen zwar noch keinen Rückschluss auf Details zu. Mit etwas Optimismus kann man sie allerdings so extrapolieren, dass es in der Mitte von Sagittarius A* einen Bereich gibt, aus dem keine Strahlung entweicht.

Zensus und Krichbaum werden sich in den kommenden Jahrzehnten zu einer treibenden Kraft entwickeln, wenn es darum geht, mit immer mehr und besseren Teleskopen gen Sagittarius A* zu blicken. Zunächst ist es aber ihr jüngerer Kollege Falcke, der selbstbewusst auf Konferenzen verkündet, man könne ein Bild des Schattens von Sagittarius A* machen. Anfangs wird er dafür zuweilen belächelt, mit der Zeit bröckelt die Skepsis seiner Kollegen jedoch.

Der endgültige Wendepunkt ist hier ein Fachaufsatz aus dem Jahr 2000, den Falcke gemeinsam mit seinen Kollegen Fulvio Melia und Eric Agol schreibt. Das Trio legt darin en détail dar, wie die Beobachtung gelingen könnte. Den Schlüssel sehen die Astrophysiker in einer Technik namens »Very Long Baseline Interferometry«, kurz VLBI. Das Verfahren ist in jenen Tagen bereits etabliert; unter anderem die Bonner MPI-Gruppe um Anton Zensus arbeitet damit. Bei VLBI blicken Astronomen mit mehreren weit entfernten Radioteleskopen auf dieselbe Quelle am Himmel. Mit Hilfe extrem präziser Atomuhren halten die Astronomen an jedem der Standorte fest, wann eine Radiowelle das jeweilige Teleskop erreicht hat. Anhand dieser Zeitstempel fügen die Forscher die Ergebnisse anschließend mit einem Supercom-

Auf die Auflösung kommt es an

Wer Genaueres über weit entfernte Regionen im Weltall lernen will, braucht ein Teleskop mit hoher Auflösung, also mit der Fähigkeit, trotz der gewaltigen Entfernungen Strukturen möglichst detailliert abzubilden.

Eine Formel aus der Astronomie gibt hier seit Langem das Limit vor: Der gerade noch auflösbare Winkelabstand zwischen zwei Punkten am Nachthimmel (Θ) ist proportional zur Wellenlänge der verwendeten Strahlung (λ) und umgekehrt proportional zur Größe des Teleskops (D): $\Theta \approx \lambda/D$. Große Parabolschüsseln wie das 100-Meter-Teleskop in Effelsberg erreichen eine Winkelauflösung von etwa zehn Bogensekunden – das entspricht 0,5 Prozent der Ausdehnung des Vollmonds am Nachthimmel. Der Ring um das Schwarze Loch im Zentrum von M87 hat am Firmament jedoch gerade mal eine Größe von 42 millionstel Bogensekunden (0,000002 Prozent des Vollmonddurchmessers).

Aber mit einem Trick lässt sich das Auflösungsvermögen deutlich verbessern: Astronomen kombinieren dazu die Aufnahmen mehrerer über den Globus verteilter Observatorien. Bei dieser Very Long Baseline Interferometry (VLBI) kann man den Abstand zwischen zwei weit entfernten Standorten als Teleskopdurchmesser in die obige Formel einsetzen. Für einen erdumspannenden Verbund aus Teleskopen, die Strahlung mit einer Wellenlänge von 1,3 Millimetern auffangen, ergibt sich eine maximale Auflösung im Bereich von 20 millionstel Bogensekunden – gerade genug, um das Schwarze Loch in M87 sowie das im Zentrum der Milchstraße erkennen zu können.

puter zusammen. Damit erhält das Bild eine deutlich bessere Auflösung. Theoretisch kann ein VLBI-Verbund dadurch Werte eines gigantischen virtuellen Teleskops von der Größe der Erde erreichen (siehe »Wie das ›Foto‹ entstanden ist«, unten).

Im Jahr 2000 ist allerdings klar: Für die Beobachtung eines Schwarzen Lochs im Zentrum einer Galaxie ist die Technik noch nicht gut genug. Denn im großen Stil funktioniert VLBI damals nur für Strahlung mit einer Wellenlänge von drei oder mehr Millimetern. Für ein Bild des Schwarzen Lochs müsste man hingegen bei einem oder einigen zehntel Millimetern Wellenlänge beobachten. Und hier steckt VLBI nach wie vor in den Kinderschuhen, trotz erster ermutigender Tests durch die Gruppe um Zensus.

Dichte Staubwolken und turbulentes Gas versperren den Blick in Richtung Schwarzes Loch

»Wir haben uns nach und nach an immer kürzere Wellenlängen und größere Basislinien herangepirscht«, erinnert sich der Bonner Astronom. Anfang der 2000er Jahre koordiniert Zensus etwa einen transatlantischen Zusammenschluss von europäischen und amerikanischen Radioteleskopen, die bei drei Millimetern beobachten, das Global mm-VLBI Array. Es sind wertvolle Erfahrungen für die spätere Arbeit mit dem Event Horizon Telescope – aber für einen klaren Blick ins galaktische Zentrum reicht es noch nicht, auch wegen der verwendeten Wellenlänge.

Hat sie einen anderen Wert als einen oder einige zehntel Millimeter, werden die Wellen entweder von der Erdatmosphäre abgefangen, oder sie kommen erst gar nicht durch die dichten Staub- und Gaswolken, die sich zwischen der Erde und dem Zentrum der Milchstraße ballen. Rund 10000 Lichtjahre von der Erde entfernt driftet besonders turbulentes Gas durchs All, das sämtliche Bilder von Sagittarius A* wie Milchglas verzerrt.

Millimeterwellen können dieses Hindernis am ehesten durchdringen. Anfang der 2000er Jahre gibt es jedoch nur wenige Anlagen, welche diese Form der Strahlung auffangen können. Die Oberflächen der Parabolantennen müssen dafür deutlich glatter sein als bei Radioteleskopen für größere Wellenlängen. Für den VLBI-Betrieb benötigt man zudem Rekorder, die sehr hohe Datenraten aufzeichnen können.

Daneben ist der Standort entscheidend: Die Teleskope sollten mehrere Kilometer oberhalb des Meeresspiegels stehen, da Wasserdampf in der Atmosphäre die Signale abschwächt. Als wäre das noch nicht genug, ist das Wetter ein wichtiger Faktor: Nur wenn der Himmel wolkenlos ist, können die Forscher aus den Daten am Ende ein stimmiges Bild rekonstruieren.

Das Event Horizon Telescope nimmt daher erst Gestalt an, als eine Reihe neuer Observatorien in Betrieb geht, die gut für Millimeter-Beobachtung geeignet sind. Etwa das Large Millimeter Telescope in Mexiko, das auf dem Gipfel des 4600 Meter hohen Sierra Negra in den Himmel blickt. Oder das Atacama Pathfinder Experiment (APEX) auf dem Chajnantor-Hochplateau in Nordchile, 5100 Meter über dem Meeresspiegel. Die Aus- und Nachrüstungen dieser und anderer Teleskope wird Jahre in Anspruch nehmen. Letztlich kommt dabei auch die Computerrevolution zur Hilfe: Sie macht Digitalrekorder immer leistungsfähiger und preiswerter.

Bei den anfallenden Arbeiten tut sich Mitte der 2000er Jahre unter anderem eine US-amerikanische Gruppe um Sheperd (»Shep«) Doeleman hervor, der damals am Massachusetts Institute for Technology (MIT) forscht. Mit großem Eifer arbeitet sich das Team an den technischen Problemen der Ein-Millimeter-VLBI ab. Es bringt dadurch vor allem die digitale Datenerfassung und die Breitbandtechnik deutlich voran.

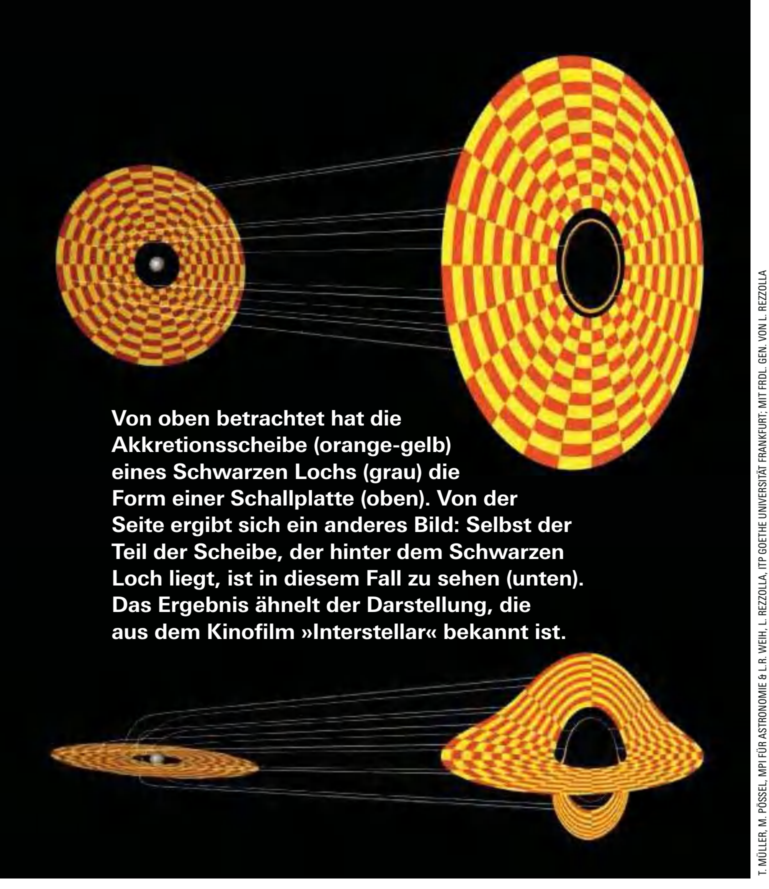
Ähnlich wie die Bonner MPI-Astronomen um Zensus und Krichbaum versuchen die Amerikaner in dieser Phase immer wieder, einen Millimeter-Blick auf Sagittarius A* zu werfen. 2006 koppelt Doelemans Gruppe dafür Teleskope in Arizona, Kalifornien und auf Hawaii und richtet sie auf das Zentrum der Milchstraße. Der erste Versuch geht schief, doch im Jahr darauf gelingt die Beobachtung: Die drei Teleskope fangen 1,3-Millimeter-Strahlung auf – die Wellenlänge, bei der später auch das EHT arbeiten wird. Aus Sicht

Wie das »Foto« entstanden ist

Wer zwei Teleskope zusammenschaltet, baut damit ein Interferometer. Lichtwellen eines fernen Objekts, die sich bei der Zusammenführung konstruktiv überlagern, erscheinen für das Teleskoppaar als heller Streifen. Strahlung, die sich gerade auslöscht, wird hingegen zu einem dunklen Bereich. So legt das Interferometer gewissermaßen ein schwarz-weißes Streifenmuster über den Himmel – Strahlung aus den hellen Regionen kann es nachweisen, jene aus dunklen Gegenden nicht.

Je größer der Abstand zwischen den Teleskopen, desto feiner wird das Muster. Hieraus bezieht die Technik der Very Long Baseline Interferometry (VLBI) ihr enormes Auflösungsvermögen. Zum einen koppelt sie Teleskope, die tausende Kilometer voneinander entfernt sind. Zum anderen ändert die Rotation der Erde laufend die Länge und Orientierung der gedachten Verbindungslinie zwischen den Observatorien, der Basislinie. Dadurch werden immer neue Raster über die anvisierte Region am Himmel gelegt.

Wenn zwei VLBI-Teleskope bei einer bestimmten Basislinie gleichzeitig kohärente Radiowellen auffangen, befindet sich ein Teil der Quelle offenbar gerade unter einem hellen Streifen des Musters. Man hat also einen Hinweis auf das Aussehen der Quelle gewonnen. Aus vielen solcher Puzzlesteine lässt sich ein Bild der Zielregion zusammensetzen. Das Event Horizon Telescope hat nur an einigen Punkten auf der Erde gemessen, deshalb sind verschiedene Bilder mit den Daten kompatibel. Vier Gruppen ermittelten daher unabhängig voneinander das plausibelste Ergebnis.



Von oben betrachtet hat die Akkretionsscheibe (orange-gelb) eines Schwarzen Lochs (grau) die Form einer Schallplatte (oben). Von der Seite ergibt sich ein anderes Bild: Selbst der Teil der Scheibe, der hinter dem Schwarzen Loch liegt, ist in diesem Fall zu sehen (unten). Das Ergebnis ähnelt der Darstellung, die aus dem Kinofilm »Interstellar« bekannt ist.

T. MÜLLER, M. PÖSSEL, MPI FÜR ASTRONOMIE & L. R. WEIH, L. REZZOLLA, ITP GOETHE UNIVERSITÄT FRANKFURT; MIT FRDL. GEN. VON L. REZZOLLA

vieler Astrophysiker ist damit die Generalprobe geglückt: »Von da an war uns klar, dass die Sache machbar ist«, erinnert sich Doeleman.

Heino Falcke, der mittlerweile an der niederländischen Universität Nimwegen arbeitet, ist in dieser Phase nur vereinzelt an den mühseligen Beobachtungen beteiligt. Als theoretischer Physiker schreibt er zwar immer wieder Veröffentlichungen zu Sagittarius A* und den Radiowellen, die vom Umfeld Schwarzer Löcher ausgehen könnten; ein guter Teil seiner Zeit gilt aber anderen Projekten.

Nach seinem wegweisenden Fachaufsatz aus dem Jahr 2000 hat sich Falcke mit Doeleman und anderen Forschern über den Weg zum Event Horizon Telescope ausgetauscht. Dabei sind Falcke und Doeleman jedoch aneinandergeraten – ein Konflikt, der die Geschichte des EHT prägen wird. Falcke will eine professionell organisierte Kollaboration nach Vorbild des Genfer Kernforschungszentrums CERN aufziehen, mit einem klar definierten Projektplan und festgelegten Zuständigkeiten. Doeleman hingegen möchte die Sache eher so angehen, wie es bei Astronomen üblich ist: in kleinen, von einem Gruppenleiter gesteuerten Teams, die spontan auf auftretende Probleme reagieren können.

Doeleman hat früh beschlossen, seine Karriere dem Event Horizon Telescope zu widmen, schreibt der amerikanische Wissenschaftsjournalist Seth Fletcher in seinem 2018 erschienenen Buch »Einstein's Shadow«. Dass Falcke viel Zeit für andere Projekte aufbringt und sich aus dem Kampf mit der Technik eher heraushält, empfindet der Amerikaner als opportunistisch. »Ich und mein Team haben damals etwas riskiert – das ist nötig, wenn man so ein ambitioniertes Projekt zum Erfolg führen will«, sagt Doeleman rückblickend.

Falcke hingegen sieht in dieser Phase laut eigener Aussage keine Möglichkeit, von der experimentellen Seite mehr beizusteuern. »Ich hatte als Postdoc nicht das Geld, irgendwo ein Teleskop zu bauen«, sagt er. Auch habe er sich mit anderen Projekten etablieren und Erfahrung sammeln wollen, beispielsweise mit dem europäischen Radiointerferometer LOFAR. »Ich bin aber immer nah drangeblieben am EHT – und ich dachte eigentlich, dass wir das am Ende gemeinsam machen.«

Im Jahr 2009 wird der Deutsche in dieser Hinsicht enttäuscht: In den USA werben Doeleman und Kollegen für eine Erwähnung in der »Astronomy and Astrophysics Decadal Review«, einem wichtigen Strategiepapier der tonangebenden US-Forschungsverbände. In dem Dokument wird Falcke jedoch nicht erwähnt, trotz gemeinsamer Vorarbeiten. Für den Deutschen wirkt es so, als werde die Idee, die er gemeinsam mit Doeleman entwickelt hat, ohne ihn umgesetzt.

Wenn man den Amerikaner heute fragt, ob er Falcke damals nicht dabeihaben wollte, schweigt er zunächst einige Sekunden in den Telefonhörer. Dann sagt er diplomatisch: »Es war zu dieser Zeit einfach nicht klar, was Heinos Rolle in dem Projekt sein sollte.« Doeleman und seinen Kollegen kommt es damals so vor, als hätten sie plötzlich viele neue Freunde: Seit ihrer gelungenen VLBI-Beobachtung von Sagittarius A* im Jahr 2007 wollen immer mehr Forscher an den jährlich wiederkehrenden Messkampagnen teilnehmen.

Doeleman treibt dabei die Sorge um, die Kontrolle über das Projekt zu verlieren – und am Ende nicht genug Anerkennung zu erhalten. Für Falcke ist der Widerstand gegen eine Zusammenarbeit hingegen nur schwer nachvollziehbar. 2011 habe er einen großen niederländischen Forschungspreis erhalten und angeboten, von dem Geld Equipment zu kaufen, erinnert er sich. Doch sein amerikanischer Kollege habe davon nichts wissen wollen.

Letztlich wird es auch Geldnot sein, welche die Wissenschaftler zusammenbringt. Erst aber gelangt Falcke in eine bessere Verhandlungsposition: Gemeinsam mit seinem einstigen Mitdoktoranden Michael Kramer, mittlerweile Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie, und dem Gravitationstheoretiker Luciano Rezzolla von der Goethe-Universität Frankfurt bewirbt er sich für eine besondere Form der Förderung durch die Europäische Union.

Plötzlich wetteifern zwei Initiativen um das erste Bild eines Schwarzes Lochs

Für diesen »ERC Synergy Grant« gehen im Jahr 2013 stattliche 449 Bewerbungen ein. Am Ende erhalten nur 13 den Zuschlag, darunter das Projekt von Falcke, Kramer und Rezzolla. Ihre »Black Hole Cam« wird von der EU mit 14 Millionen Euro gefördert. Das Ziel liegt dabei sehr nah an dem des Event Horizon Telescope: Man will ebenfalls das galaktische Zentrum studieren, das Schwarze Loch dort fotografieren und unter anderem nach Neutronensternen suchen, die in der turbulenten Region umherdriften müssten.

Nun gibt es plötzlich zwei Initiativen, die ein Schwarzes Loch ablichten wollen. Zunächst hegen die europäischen Forscher den Gedanken, eigenständig auf dieses Ziel hinzuarbeiten. Schnell erkennen sie jedoch, dass sie die besten Erfolgsaussichten haben, wenn sie mit ihren Kollegen auf der anderen Seite des Atlantiks zusammenarbeiten. Dennoch

sorgt der ERC-Grant für Unmut bei manchen Forschern des Event Horizon Telescope, allen voran bei Doeleman.

In Amerika stockt allerdings die Forschungsförderung, das Geld für das EHT ist knapp. Und so finden sich europäische und amerikanische Radioastronomen bald in zähen Verhandlungen über einen Zusammenschluss der Initiativen wieder. Auf einer Konferenz in Waterloo im November 2014 einigt man sich schließlich auf eine Organisationsstruktur für die Event Horizon Collaboration. Letztlich wird Doeleman Direktor, Falcke Leiter des Wissenschaftsausschusses, und Zensus nimmt als Vorsitzender des Kollaborationsrats eine Vermittlerrolle ein.

Die letzten offenen Fragen räumen die Forscher aber erst aus, als das Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) sie zu einer Einigung zwingt. Die 66 Parabolantennen im chilenischen Hochland bilden seit ihrer Einweihung im Jahr 2013 das weltweit leistungsfähigste Observatorium für Millimeter-Strahlung. Und nach und nach realisieren die Forscher, dass sie es unbedingt brauchen, wenn das Event Horizon Telescope ein Erfolg werden soll. Die Leitung von ALMA legt allerdings großen Wert auf internationale Zusammenarbeit – kein Wunder, schließlich wird der Teleskopverbund außer von der Europäischen Südsternwarte ESO auch von einer amerikanischen und einer japanischen Forschungsorganisation betrieben. Doeleman und seinen Kollegen wird klar: Sie können ALMA nur dann verwenden, wenn sie mit Falckes ERC-Projekt und asiatischen Wissenschaftlern zusammenarbeiten.

Und so kommt es, dass im April 2017 acht um den Globus verteilte Observatorien in Richtung Sagittarius A* und M87 blicken. Neben ALMA ist auf europäischer Seite auch das 30-Meter-Teleskop IRAM in der spanischen Sierra Nevada beteiligt, das unter anderem von der Max-Planck-Gesellschaft betrieben wird, sowie das APEX-Teleskop in Chile. An allen Standorten ist der Himmel klar, selbst am South Pole Telescope, das als Teil der Amundsen-Scott-Südpolstation 2800 Meter über dem Meeresspiegel arbeitet. Da es M87 zu dieser Zeit des Jahres nicht sehen kann, dient es vor allem zur Kalibrierung der Beobachtungen.

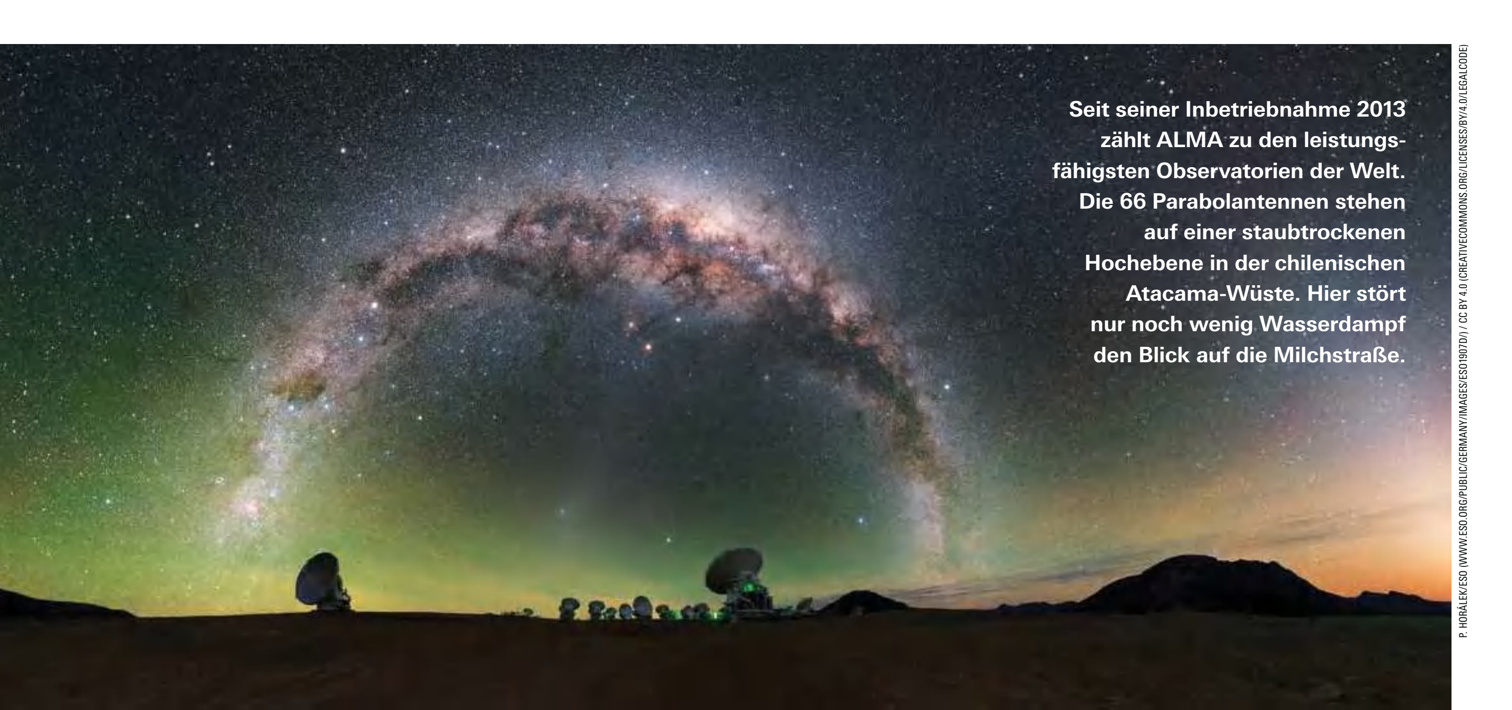
Stunde für Stunde verfolgen die Teleskope ihre Ziele am Himmel. Nach drei Tagen sind die übernächtigten Forscher zu erschöpft, um weiterzumachen. Zwei Tage später setzen sie die Beobachtung noch einmal fort – und sammeln erneut zwei Nächte lang wertvolle Daten. Ein halbes Jahr dauert es, bis alle Festplatten am MIT sowie am Max-Planck-Institut für Radioastronomie angekommen sind – vom Südpol können sie erst nach Ende des antarktischen Winters ausgeflogen werden. An speziell programmierten Supercomputern fügen die Wissenschaftler die Messreihen zusammen. In mühsamer Kleinstarbeit trennen sie Radiowellen von Rauschen und suchen nach Fehlern. Erst nach Monaten sind die Daten so weit »kalibriert«, dass andere Arbeitsgruppen aus den Radiowellen ein Bild rekonstruieren können.

In dieser Phase wird den Forschern klar, dass die Beobachtungsdaten von M87 die reichste Beute versprechen. Das dortige Schwarze Loch ist zwar 2000-mal so weit entfernt wie das im Zentrum unserer Milchstraße. Aber dafür ist es auch 1500-mal schwerer und damit entsprechend größer. Es nimmt daher fast dieselbe, winzige Fläche am Nachthimmel ein. Und im Vergleich zu Sagittarius A* verändert sich sein direktes Umfeld deutlich langsamer. Die Materie in der Akkretionsscheibe benötigt Tage, um sich sichtbar zu verschieben – im Zentrum der Milchstraße geschieht dies binnen Minuten. »Es ist so, als wollte man ein herumzappelndes Kleinkind mit einer langsamen Kamera fotografieren«, sagt Falcke.

Die Astrophysiker konzentrieren ihre Ressourcen bei der Bilderstellung daher ganz auf M87. Das Prozedere ist nicht weniger mühsam als die Datenaufbereitung, schließlich haben die Radiowellen-Observatorien nur an acht Punkten auf der Erdkugel Daten aufgezeichnet. Theoretisch ist also eine Vielzahl von Bildern mit den aufgezeichneten Datenpunkten kompatibel. »Das Ganze ähnelt einem Puzzle, in dem man nur ein paar Teile hat«, sagt EHT-Forscherin Monika Moscibrodzka von der Universität Tübingen.

Ein leuchtender Kranz, der einen dunklen Kreis umschließt

Vier Gruppen arbeiten unabhängig voneinander daran, aus diesen Teilen das plausibelste Bild zusammenzusetzen. Dazu vergleichen sie die aufgefangenen Radiowellen mit zehntausenden am Computer erstellten Bildern, die alle denkbaren



Seit seiner Inbetriebnahme 2013 zählt ALMA zu den leistungsfähigsten Observatorien der Welt. Die 66 Parabolantennen stehen auf einer staubtrockenen Hochebene in der chilenischen Atacama-Wüste. Hier stört nur noch wenig Wasserdampf den Blick auf die Milchstraße.



DICK VAN AALST/UNIVERSITÄT NIJMEGEN (WWW.MPG.DE/7676792/ERC_SYNERGY_GRANTS_2013)

Heino Falcke, Luciano Rezzolla und Michael Kramer (von links nach rechts) erhielten 2013 eine hoch dotierte Förderung von der Europäischen Union. Sie spielte eine Schlüsselrolle in der Geschichte des Event Horizon Telescope.

Möglichkeiten abdecken. Umso größer ist die Erleichterung, als die vier Teams schließlich ihre Ereignisse vergleichen: Sie alle haben einen leuchtenden Kranz rekonstruiert, der einen dunklen Kreis umschließt.

Damit ist aber noch die Frage offen, was denn nun auf der rekonstruierten Aufnahme genau zu sehen ist. Unter anderem das Frankfurter Team um Luciano Rezzolla erstellt mit einem eigens programmierten Computercode hunderte Szenarien für die komplizierten Abläufe im unmittelbaren Umfeld des Schwarzen Lochs. Für jedes von ihnen muss ein Supercomputer mit knapp 1000 Prozessorkernen tagelang rechnen. Dank dieser magneto-hydrodynamischen Simulationen können die Wissenschaftler letztlich ermitteln, welche physikalischen Vorgänge am besten zu dem rekonstruierten Bild des EHT passen.

Am Ende ähnelt die Aufnahme aus dem Zentrum von M87 am ehestem dem, was viele Forscher im Vorfeld vermutet hatten: dem Schatten eines Schwarzes Lochs, das von heißer Materie umgeben ist. Und vieles spricht dafür, dass es sich um ein rotierendes Exemplar handelt, so wie es der Neuseeländer Roy Kerr 1963 erstmals beschrieben hat. Mit dieser Kerr-Metrik jedenfalls ließe sich erklären, dass der untere Rand des Rings heller erscheint. Hier bewegt sich die strahlende Materie auf den Beobachter zu, vermuten die Forscher. In diesem Fall träte ein an den klassischen Doppler-Effekt erinnerndes Phänomen aus der Relativitätstheorie auf, das »relativistische Beaming«, das die eine Seite des Kranzes aufhellt.

Wie es in der Umgebung des Schwarzen Lochs genau aussieht, können die Forscher allerdings noch nicht sagen. Dazu ist zum einen die Aufnahme noch nicht scharf genug. Zum anderen machen es Schwarze Löcher neugierigen Beobachtern denkbar schwer. Die Masseklumpen lenken Strahlung stark um, so dass man nicht immer genau sagen kann, wo ein auf dem Bild verewigter Lichtstrahl seinen Ursprung hat. Auch ändert sich das Bild je nach Blickrichtung, wie Simulationen von Luciano Rezzolla zeigen (siehe Grafik S. 49). Im Fall von M87 gehen die Astrophysiker davon aus, dass man von der Erde aus fast direkt von oben auf die Akkretionsscheibe blickt, unter einem Winkel von 17 Grad zur Totalen. Das Licht auf der EHT-Aufnahme, oder zumindest ein Teil davon, könnte dabei auch vom Ursprung des uns zugewandten Jets stammen.

Offen ist auch die Frage, wie gut die Aufnahme zu den Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie passt. Spätestens hinter dem Ereignishorizont, in der Singularität, müsste das Regelwerk für die Gravitation ihre Aussagekraft verlieren. Zeigen sich vielleicht bereits im Umfeld Abweichungen? »Bisher stehen unsere Beobachtungen in gutem Einklang mit Einsteins Theorie«, sagt Rezzolla. Ein rotierendes Schwarzen Loch ist jedoch nur eine der denkbaren Lösungen für die Gleichungen der Relativitätstheorie. Immer wieder haben Physiker auch Alternativen diskutiert. Einige sehr exotische Möglichkeiten können die Forscher nun ausschließen: Unter anderem »nackte« Singularitäten und bestimmte Typen von Wurmlöchern passen überhaupt nicht zu dem Bild aus dem Zentrum von M87.

Generell sei die Bedeutung des Bildes immens, findet Rezzolla: »Wir haben das mathematische Konzept eines Ereignishorizonts, das ich bisher lediglich in Vorlesungen an die Tafel schreiben konnte, in ein physikalisches Objekt verwandelt.« Man könne dieses Objekt nun immer wieder beobachten und Theorien damit testen. »Das ist ein fundamentaler erster Schritt, wenn man wissenschaftlich vorankommen will.«

Gelegenheit dazu wird es in Zukunft vermutlich immer wieder geben. Zunächst wollen die Forscher noch den Datensatz des Jahres 2018 auswerten. Ob er das Bild des Schwarzen Lochs aus M87 oder dem Zentrum der Milchstraße deutlich verbessern kann, ist unklar: »Das Wetter war schlecht, und zu allem Überfluss fiel auch noch ALMA aus«, sagt Falcke. 2019 sagten die Astronomen die Beobachtungskampagne kurzerhand ab, unter anderem weil sich die Sicherheitslage in Mexiko stark verschlechtert hatte.

Aber im Frühling 2020 wollen die Forscher erneut um den Globus verteilte Parabolantennen koppeln, diesmal auch mit Instrumenten in Frankreich und auf Grönland. Mittelfristig werben Falcke und Kollegen außerdem für den Bau eines Observatoriums in Namibia. Und irgendwann wollen die Forscher dann ganz hoch hinaus: Mit zwei oder drei Radioteleskopen, die in einem Erdorbit schweben, könnte man Schwarze Löcher noch besser beobachten – völlig unabhängig vom Wetter auf der Erde. ◂

QUELLEN

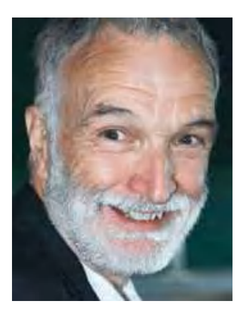
Doeleman, S. et al: Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Center. Nature 10.1038/nature07245, 2008

Falcke, H. et al.: Viewing the shadow of the black hole at the galactic center. The Astrophysical Journal 528, 2000

Krichbaum, T.P. et al.: VLBI observations of the galactic center source Sgr A* at 86 GHz and 215 GHz. Astronomy & Astrophysics 335, 1998

The Event Horizon Telescope Collaboration: First M87 Event Horizon Telescope Results. The Astrophysical Journal Letters 875, 2019

SCHLICHTING!
GEFÄHRLICHE SCHRÄGLAGE



Ist ein Sandhaufen zu steil, rutschen Teile von ihm ab. Doch was passiert mit größeren Objekten auf dem Hang? Ob sie am kritischen Winkel stabil liegen oder ins Gleiten geraten, hängt davon ab, wie stark sie den Untergrund deformieren.

H. Joachim Schlichting war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Seit 2009 schreibt er für **Spektrum** über physikalische Alltagsphänomene.

spektrum.de/artikel/1647846

Ein kleiner Irrtum am Anfang wird am Ende ein großer
Giordano Bruno (1548–1600)

Ein wachsender Sandhaufen wird ab einer bestimmten Neigung nicht mehr steiler. Vielmehr stellt sich ein charakteristischer Schüttwinkel ein, indem oben aufgetürmter Sand gelegentlich in Lawinen niedergeht. Sie flachen den Haufen ab, so dass darauf wieder Sandkörner liegen bleiben können, bis der kritische Winkel erneut überschritten wird. In der nichtlinearen Physik spricht man bei solchen Phänomenen von selbstorganisierter Kritikalität.

Es hängt zwar von zufälligen Störungen ab, wann genau ein Abgang ausgelöst wird. Trotzdem ist der Prozess nicht ganz wahllos, sondern die Verteilung der Lawinen folgt einem Potenzgesetz – große kommen seltener, kleinere viel häufiger vor. Derartige Skalengesetze gibt es überall in Natur und Alltag. Sie beschreiben so verschiedene Phänomene wie die Verteilung der Einwohnerzahl deutscher Städte oder die Ausmaße von Mondkratern.

Versucht man einen solchen Haufen zu besteigen, etwa auf der lockeren Leeseite aktiver Sanddünen, ist das eine sportliche Herausforderung: Mit jedem Schritt nach oben gleitet man auf einer kleinen Lawine wieder ein Stück zurück. Weil ein Mensch aber dank seines Körpergewichts zugleich in den Sand einsinkt, bildet sich nach der kurzen Rutschpartie an den Füßen ein Wall mit einer unterkritischen Neigung. Darauf kann sich der Wanderer abdrücken, um etwas höher zu kommen.

Ein winziges Insekt hat es da einfacher. Es krabbelt den Hang hinauf, ohne dass viel passiert. Hier und da rieseln ein paar Körnchen herab, aber es kommt voran. Doch wie ergeht es größeren Insekten, die den kritisch angewinkelten Untergrund stark genug stören und eine Lawine auslösen?

Die Antwort liefert die Larve des Ameisenlöwen. Das Insekt bedient sich dieses Phänomens bei der Jagd. Dazu baut es einen Trichter und bringt dessen schräge Wände immer wieder in den verhängnisvollen Winkelbereich (siehe Foto unten). Ameisen, Käfer, Spinnen und andere Kleintiere haben just die richtige Masse. Wenn sie auf die inneren Flanken geraten und sie dadurch überkritisch machen, lösen sie einen Hangrutsch aus. Darauf gleiten



H. JOACHIM SCHLICHTING

Die Larven von Ameisenlöwen bauen Sandtrichter, in denen sie auf Beute lauern. Damit schlägt das Insekt auch im übertragenen Sinn mehrere Fliegen mit einer Klappe: In seinem dauerhaft trockenen, oft wüstenartigen Lebensraum ist es durch den Schatten der sonnenabgewandten Hangseite vor Hitze und Austrocknung geschützt.







Auf einer im kritischen Winkel geneigten Sandfläche bleibt ein Plastikdeckel liegen (links). Mit einer Unterlegscheibe belastet sinkt er etwas ein und gleitet den Hang hinab (Mitte). Bei mehreren Scheiben rutscht er tief in den Sand und stoppt nach kurzer Strecke (rechts).

H. JOACHIM SCHLICHTING

sie dann hinab – der am unteren Ende halb vergraben lauernden Larve entgegen.

Das Tierchen muss dazu einen perfekten Trichter mit genau der grenzwertigen Neigung bauen, ohne selbst ständig abzurutschen und das schöne Werk zu beschädigen. Die Lösung des Problems ist ebenso einfach wie trickreich. Zunächst treibt die Larve in einer Art rückwärtiger Schiebetechnik einen groben Krater im unterkritischen Neigungsbereich in den sandigen Grund. Daraufhin schleudert sie von der Mitte aus lockeren Sand nach oben. Solange der kritische Winkel noch nicht erreicht ist, bleibt er liegen. Sobald er überschritten wird, rutscht das Baumaterial ab.

Vom tierischen Instinkt zur wissenschaftlichen Analyse

Kommen der Larve im zeitlichen Mittel genauso viele Sandkörner wieder entgegen, wie sie hochkatapultiert, ist ihr Werk vollendet. Die gleiche Technik wendet die Larve an, wenn ein Beutetier zu entkommen droht. Dann wirft sie dem Fliehenden einige Sandladungen hinterher, wodurch die Wand überkritisch wird und es kein Halten mehr gibt.

Das Beispiel des Ameisenlöwen zeigt, dass die Natur die selbstorganisierte Kritikalität schon lange genutzt hat, bevor die Physiker sie entdeckt haben. Inzwischen hat sich auch eine französische Forschergruppe des interessanten Phänomens angenommen. Sie ist in einer 2017 publizierten Arbeit allgemein der Frage nachgegangen, wie sich gleitende Gegenstände auf einer Flanke aus granularer Materie verhalten.

Dabei entzieht sich der körnige Feststoff im kritischen Winkelbereich einer deterministischen Beschreibung – ein- und dasselbe Objekt kann unter sonst gleichen Bedingungen sowohl in Bewegung geraten als auch zur Ruhe kommen. Kleinste Störungen geben den Ausschlag. Daher lassen sich die Vorgänge nur mit Wahrscheinlichkeiten auf Basis zahlreicher Experimente beschreiben.

Als schiefe Ebene benutzten die Forscher einen Schütthaufen aus winzigen Glaskügelchen. Darauf setzten sie kleine Pappscheiben mit Metallgewichten und untersuchten, wie sich die Gleiter unter verschiedenen Bedingungen verhalten. Die Wissenschaftler haben dabei den Druck variiert, also den Quotienten aus Gewichtskraft und Auflagefläche der Scheiben. Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchung: Die Gleiter bewegten sich nur in einem kleinen Bereich unterschiedlicher Drücke den ganzen Hang hinab. Zu schwere und zu leichte Scheiben blieben liegen oder stoppten nach kurzer Strecke.

Ursache für dieses Verhalten ist die mehr oder weniger starke Verformung des granularen Untergrunds. Das lässt sich mit Hausmitteln einfach qualitativ nachvollziehen, etwa mit einem Sandhaufen und einem kleinen, flachen Plastikdeckel sowie mehreren Unterlegscheiben als potenzielle Zusatzlasten (siehe Bilder oben). Solange wenig Gewicht auf dem Gleiter lastet, bleibt er ruhig liegen. Wenn jedoch der Druck, also die Kraft pro Fläche, ein kritisches Maß überschreitet, bewegt er sich hangabwärts und hinterlässt eine feine Spur im Sand. Sie wird bei größerem Gewicht aber so tief, dass der Deckel einen wachsenden Wall vor sich herschiebt, der ihn nach kurzer Strecke ausbremst. Die Gleitfähigkeit eines gegebenen Gleiters hängt im Bereich des kritischen Winkels also hauptsächlich von der Gewichtskraft ab.

Diese Ergebnisse geben Aufschluss über das Verhalten von Lebewesen auf sandigem Untergrund. Sie erklären die Erfahrungen von Menschen, die sich an der kritischen Wand einer Düne abmühen, ebenso wie die erfolgreiche Strategie der Larve des Ameisenlöwen. Sowohl zu leichte wie auch zu schwere Tiere kann sie damit nicht fangen. Laut der Untersuchungen der Wissenschaftler haben Tiere unterhalb eines Körpergewichts von zwei Milligramm nichts zu befürchten, ebenso wenig solche mit mehr als fünf Milligramm. Aber auf beide hat es die Larve auch gar nicht abgesehen. Die einen lohnen den Aufwand nicht, und die anderen sind als Beute zu groß. ◂

QUELLE

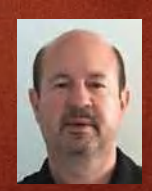
Crassous, J. et al.: Pressure-dependent friction on granular slopes close to avalanche. Physical Review Letters 119, 2017

KLIMAWANDEL
GEFÄHRLICHER WETTERVERSTÄRKER

Unwetter mit schweren Überschwemmungen oder Hitzewellen werden immer häufiger und dramatischer. Das liegt daran, dass der Jetstream schwächer wird und große Kurven beschreibt. Die globale Erwärmung beschleunigt diesen Trend – warum, kann man mit Hilfe quantenmechanischer Modelle erklären.

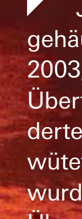
Hitze und Dürre fachten im September 2018 in Kalifornien verheerende Waldbrände an.

GETTY IMAGES / AFP / JOSH EDELSON



Michael E. Mann ist Professor für Atmosphärenforschung und Direktor des Earth System Science Center an der Pennsylvania State University. Er hat mehrere Bücher verfasst.

spektrum.de/artikel/1647840



Das Wetter spielt verrückt, hört man immer häufiger. Und tatsächlich haben sich gerade in den letzten Jahrzehnten verheerende Wetterereignisse im Sommer gehäuft: beispielsweise die Hitzewelle in Europa im Jahr 2003, Waldbrände in Russland 2010 und die gleichzeitigen Überflutungen in Pakistan, die zahlreiche Todesopfer forderten. Während des Hitzesommers 2018 in Mitteleuropa wüteten auch in Kalifornien Waldbrände, und zeitgleich wurde der Nordosten der USA von starken Regenfällen und Überflutungen heimgesucht. Das ist kein Zufall, wie meine Kollegen und ich glauben: Denn all diesen Vorfällen gemeinsam war ein ungewöhnliches Verhalten des Jetstreams. Dieser Luftstrom weht als ein schmales Band in acht bis zwölf Kilometer Höhe von West nach Ost rund um die Nordhalbkugel etwa über Mitteleuropa und weiter entlang der Grenze zwischen den USA und Kanada. Manchmal bewegt er sich relativ geradlinig, er kann aber auch große s-förmige Kurven nach Norden und Süden beschreiben. Während sich solche Biegungen vorwärtsschlängeln, befördern sie warme Luft nach Norden oder kühle Luft nach Süden, was dort jeweils Niederschläge verursacht. So bestimmt der Jetstream unser tägliches Wetter.

Während der genannten Wetterextreme verhielt sich der Jetstream anders als sonst: Seine Kurven dehnten sich außerordentlich weit nach Norden und Süden aus – und statt wie gewöhnlich weiter in Richtung Osten zu ziehen, blieben sie an Ort und Stelle stehen. Je ausladender die Kurve, desto extremer wird das Wetter in den Regionen, die der nördliche Wellenberg beziehungsweise das südliche Wellental einschließen. Bleiben die Wellen dann stehen, wie zum Beispiel im Sommer 2018 in den USA, bekommen die Gegenden, die sich direkt unterhalb der Kurven des Jetstreams befinden, je nach ihrer Lage tagelang heftigen Regen oder sengende Hitze zu spüren. Die Folge sind Rekordfluten beziehungsweise Dürren, Hitzewellen und Waldbrände.

Durch die globale Erwärmung treten solche stark ausgebeulten, stehenden Wellenmuster, die extremes Wetter begünstigen, immer häufiger auf. Das haben wir 2017 gezeigt. Nach unseren Vorhersagen werden sie in den nächsten Jahrzehnten jedoch nicht mehr so stark zulegen, wie es bisher der Fall war. Das ist aber kein Grund, aufzuatmen: Denn etwa ab dem Jahr 2050 werden auffällige Wetterereignisse deutlich heftiger werden, vor allem im Sommer, sagen unsere Prognosen. Immer verheerendere

GETTY IMAGES / AFP / JOSH EDELSON

Stürme und Ernteausfälle bedrohen dann zunehmend die menschliche Gesundheit und Sicherheit.

Diese Schlüsse ziehen wir mit Hilfe von Wellenmathematik und Quantenmechanik. Sie beschreiben das Verhalten winziger Teilchen wie Elektronen und helfen seltsamerweise auch, Phänomene unserer Atmosphäre zu erklären, die auf einer ganz anderen Größenskala ablaufen. Alles deutet darauf hin, dass ein merkwürdiges Zusammenspiel von Treibhausgasemissionen und Schwefeldioxidbelastung der Luft bestimmt, wie sich der Trend zu extremen Unwettern künftig entwickeln wird. Und dieses Zusammenspiel wirft die Frage auf, ob wir durch die Senkung der CO_2-Emissionen vielleicht verhindern könnten, dass der Jetstream Chaos und Verwüstung anrichtet.

Der Jetstream entsteht dort, wo sich warme Luft aus den Subtropen nach Norden bewegt und auf kalte Luft aus der Polarregion trifft. Er bläst in der Tropopause, der Schicht zwischen der Troposphäre (der untersten Schicht der Atmosphäre, in der sich das Wetter abspielt) und der Stratosphäre (der nächsthöheren Schicht, in der Flugzeuge fliegen).

Je größer der Temperaturunterschied beim Zusammentreffen von subtropischer und polarer Luft ist, desto stärker wird der Jetstream. Weil die Differenz im Sommer geringer ist als im Winter, weht der Strom dann schwächer und neigt eher dazu, ausgedehnte Nord-Süd-Kurven zu beschreiben.

Der Jetstream selbst wird von einer Reihe riesiger Wellen beeinflusst, die durch die Atmosphäre wabern. Diese so genannten Rossby-Wellen sind nach dem schwedisch-amerikanischen Meteorologen Carl-Gustaf Rossby benannt, der erstmals in den 1930er Jahren die Physik großräumiger atmosphärischer Bewegungen erklärte. Sie entstehen natürlicherweise, wenn sich ein Körper wie die Erde in einem Fluid (einem flüssigen oder gasförmigen Medium) dreht – in diesem Fall Luft. Auch in Ozeanen treten solche Wellen auf.

AUF EINEN BLICK
JETSTREAM IN RESONANZ

1 Wenn das weltumspannende Starkwindband ausgeprägte Kurven nach Norden und Süden beschreibt, verursacht das Hitzewellen oder heftige Regenfälle. Manchmal können sie tagelang andauern.

2 Quantenmechanische Modelle erklären, wie ein Resonanzmechanismus in der Atmosphäre die Ausschläge des Jetstreams verstärken kann. Außergewöhnliche Wetterereignisse werden dann noch folgenreicher.

3 Bis etwa 2050 dürfte sich der Trend laut Prognosen abflachen. Doch von da an werden die Wetterextreme um ein Vielfaches häufiger und gravierender, sollte der weltweite CO_2-Ausstoß nicht rasch gesenkt werden.

Rossby-Wellen in der Atmosphäre erstrecken sich über Hunderte von Kilometern und bewegen sich auf der Nordhalbkugel von West nach Ost. Im Sommer, wenn der Temperaturunterschied zwischen den Luftmassen abnimmt, beschreiben sie stärkere Kurven und rücken langsamer vor. Damit bewegen sich auch die Windungen des Jetstreams langsamer vom Fleck.

Diese Biegungen erzeugen lokale Wettersysteme, die sich mit dem Strom nach Osten bewegen. Auf Wetterkarten erscheinen sie als große Hoch- und Tiefdruckgebiete. Ein Hochdruckgebiet, das sich unterhalb einer nördlichen Ausbuchtung (eines so genannten Höhenrückens) befindet, dreht sich im Uhrzeigersinn und bringt im Sommer trockenes, heißes Wetter mit. Für nasses, kühles Wetter sorgen die Tiefdruckgebiete, die sich oberhalb der südlichen Ausbuchtungen (der so genannten Höhentröge) befinden und sich gegen den Uhrzeigersinn drehen. Ist der Jetstream zu schwach, um sich weiterzubewegen, kommt die s-förmige Rossby-Welle zum Stillstand und rückt nicht weiter nach Osten vor – eine stehende Welle bildet sich aus. In der Folge drehen sich die Hoch- und Tiefdrucksysteme im Kreis und heizen die unter ihnen liegende Erde immer mehr auf oder traktieren sie mit heftigen Regenschauern und Überschwemmungen. Das geschah beispielsweise, als Hurrikan Harvey und Hurrikan Florence über die USA fegten.

Die Atmosphäre kann die Ausschläge des Jetstreams wie ein Wellenleiter verstärken

Wirklich extremes Wetter entsteht, wenn die Kurven der Rossby-Wellen und damit der Jetstream in hohem Maße verstärkt werden. Je höher die Rücken und je tiefer die Tröge, desto ausgeprägter sind die Hoch- und Tiefdrucksysteme. In diesem stehenden Wellenmuster kommt das Hochdrucksystem zum Stillstand (manchmal auch blockierende Wetterlage genannt). Genau solch ein Effekt verursachte im Juli 2018 eine Hitzewelle im Südwesten der USA und gleichzeitig Überschwemmungen im Nordosten, vor allem in Pennsylvania und Maryland. Ein weiteres klassisches Beispiel für so ein stehendes Wellenmuster war das Hoch über Russland im Juli 2010, das Rekordhitze, Trockenheit und Waldbrände mit sich brachte, während verheerende Überschwemmungen Teile Pakistans heimsuchten.

Gewöhnliche Rossby-Wellen können sich nur so weit nach Norden und Süden ausdehnen, wie es ihre Energie erlaubt. Unter bestimmten Bedingungen kann die Atmosphäre sie jedoch wie ein Wellenleiter verstärken. Diesen kann man sich wie zwei Linien vorstellen, die den Jetstream im Norden und Süden begrenzen. Eine Rossby-Welle schlängelt sich nun innerhalb der dadurch gegebenen Grenzen vorwärts und verliert dabei nur wenig Energie. Diese Schranken halten auch den mäandernden Jetstream mit seinen starken Hoch- und Tiefdrucksystemen gefangen.

Im Alltag begegnet man Wellenleitern etwa in Form des Koaxialkabels am Fernseher. Die elektromagnetischen Wellen, die das Fernsehsignal übertragen, sind weitestgehend innerhalb des Kabels gefangen. So geht lediglich ein kleiner Teil der Energie des Signals verloren, und wir sehen gestochen scharfe Bilder.



GETTY IMAGES / CORBIS / GIDEON MENDEL

Verheerende Überschwemmungen, hervorgerufen durch den atmosphärischen Effekt der so genannten Quasiresonanzverstärkung, setzten weite Teile Pakistans im Jahr 2010 unter Wasser.

Bilden sich stehende Wellen aus, können die Ausschläge unter bestimmten Umständen in ihrer Amplitude wachsen. Dieses physikalische Phänomen ist als Resonanz bekannt. Im Sommer geschieht genau das öfter mit Rossby-Wellen, ein Effekt, der als Quasiresonanzverstärkung (QRA, englisch: quasi-resonant amplification) bezeichnet wird. Im Jahr 2013 zeigten Vladimir Petoukhov und seine Mitarbeiter am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, dass es von der Form des Jetstreams abhängt, ob die Bedingungen für QRA günstig sind. Der Klimawandel kann diese beeinflussen – und damit auch die QRA sowie die Häufigkeit extremer Sommerwetterereignisse.

Interessanterweise hilft die Quantenmechanik zu verstehen, wie diese Faktoren zusammenwirken. In der klassischen Physik kann man ein Elektron gedanklich in einen Behälter »einsperren«, wenn dessen Wände unendlich hohe potenzielle Energie besitzen. Das Elektron kann die Wände nicht passieren und hüpft daher zwischen ihnen hin und her – würde man von der Seite auf den Behälter blicken, sähe man es unaufhörlich auf einer geraden Linie von links nach rechts und wieder zurück springen.

Die quantenmechanische Sicht auf das Gedankenexperiment ist etwas anders: Das Elektron hat keine definierte Position mehr. Man kann aber mittels der berühmten Schrödinger-Gleichung die Wahrscheinlichkeit angeben, wo das Elektron am ehesten anzutreffen ist. Sie ist eine Wellengleichung und beschreibt eine Sinuskurve, ein liegendes S, genau wie der gewundene Jetstream. Das Elektron verhält sich also nicht ausschließlich wie ein Teilchen, sondern auch wie eine Welle.

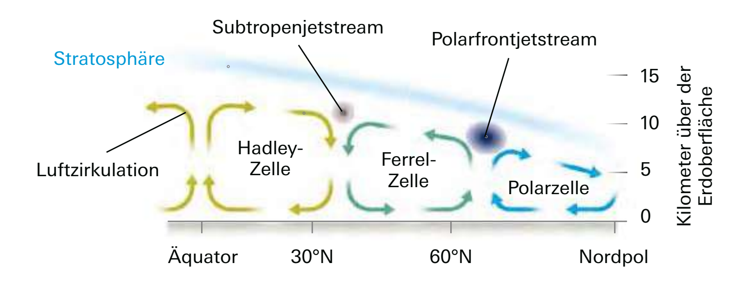
Interessant wird es, wenn die Wände keine unendlich hohe potenzielle Energie mehr besitzen, sondern eine endlich hohe. Dann kann das Elektron mit einer geringen Wahrscheinlichkeit tatsächlich in die Wand eindringen und – wenn diese dünn genug ist – sogar durch sie hindurchgelangen: Man spricht vom Tunneleffekt. An der gegenüberliegenden Wand besteht dieselbe Wahrscheinlichkeit. Der Behälter, in dem sich das Elektron größtenteils aufhält, hat quasi zwei kleine »Löcher«.

Dasselbe Bild bietet sich, wenn man sich einen dreidimensionalen Hohlleiter wie etwa ein Koaxialkabel vorstellt, der ganz leicht undicht ist. Die Gleichungen, welche die Objekte innerhalb des Hohlleiters beschreiben, kann man mit einem mathematischen Trick lösen, der so genannten WKB-Approximation (benannt nach den drei Wissenschaftlern, die sie 1926 eingeführt haben – Gregor Wentzel, Hendrik Kramers und Léon Brillouin). Diese Annäherung wird in der Quantenmechanik für viele Wellengleichungen verwendet und hilft bei der Entwicklung praktischer Elektronikteile wie Tunneldioden in Smartphones.

In den frühen 1980er Jahren demonstrierten David Karoly, heute bei der australischen Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, und Brian Hoskins von der University of Reading in England, dass sich die Erdatmosphäre wie ein Hohlleiter für stehende Rossby-Wellen verhalten kann, wenn diese bestimmte kurze Wellenlängen aufweisen. Konkret ist das der Fall bei sechs bis acht vollen Wellen um die Nordhalbkugel.

Hartnäckige Wetterextreme

Der Jetstream ist die Triebfeder für das Wetter auf der Nordhalbkugel. Bildet er Kurven aus, kann er ausgeprägte Hoch- und Tiefdruckzentren erzeugen, die große Hitze oder heftigen Regen verursachen. Sehr große Kurven können zum Stillstand kommen, so dass sich die Wetterlage viele Tage lang hält, vor allem im Sommer. Interessanterweise ähnelt die Physik, die sich in dieser planetaren Größenordnung abspielt, der Quantenmechanik, die Gesetze auf der Größenskala von Atomen beschreibt.



Ein Starkwind umströmt die Erde

Jetstreams treten ungefähr um den 30. und den 60. Breitengrad auf, zwischen den großen atmosphärischen Zirkulationssystemen (Grafik oben). Der Polarfrontjetstream auf der nördlichen Halbkugel weht von West nach Ost um den Globus: Manchmal annähernd gerade, manchmal bildet er Kurven aus (unten). Wettersysteme folgen diesem Pfad.

Wellenleiter am Himmel

Der atmosphärische Wellenleiter, der Rossby-Wellen einschließt, ähnelt mathematisch einem Quanten-Wellenleiter, der ein Elektron gefangen hält. In der klassischen Physik verhält sich ein Elektron in einem Behälter mit unendlich hohen Wänden (diese stehen symbolisch für eine unendlich hohe Energiebarriere) wie ein Teilchen, das hin- und herspringt (A, links). Haben die Wände nur eine mäßig hohe Energie, kann ein Elektron aus dem Behälter entweichen (A, rechts). In der Quantenphysik hingegen verhält sich ein Elektron wie eine Welle, die in einem Wellenleiter gefangen ist (B). Ist dieser schwach (besitzt also mäßig hohe Energie), kann das Elektron mit einer messbaren Wahrscheinlichkeit außerhalb des Behälters angetroffen werden. Ganz ähnlich verhalten sich Rossby-Wellen, die mit einem kurvigen Jetstream in Verbindung gebracht werden, wenn sie in einem atmosphärischen Wellenleiter feststecken. Die Erde unter ihnen bekommt dann dauerhaft Hitze oder Regen zu spüren.

Hoch- und Tiefdruckzentren wachsen

Im Sommer entstehen durch ausgeprägte Kurven im Jetstream Tiefdrucksysteme (T), die kaltes, nasses Wetter mitbringen, und Hochdrucksysteme (H), die für heiße, trockene Bedingungen sorgen. Manchmal nimmt der Jetstream eine sich wiederholende, ondulierende Form an. Diese folgt der Form der Rossby-Wellen, die sich in der Atmosphäre bilden, weil die Erde sich darin dreht. Das Wellenmuster – und mit ihm das Wetter – schreitet von West nach Ost voran.

Erdrotation

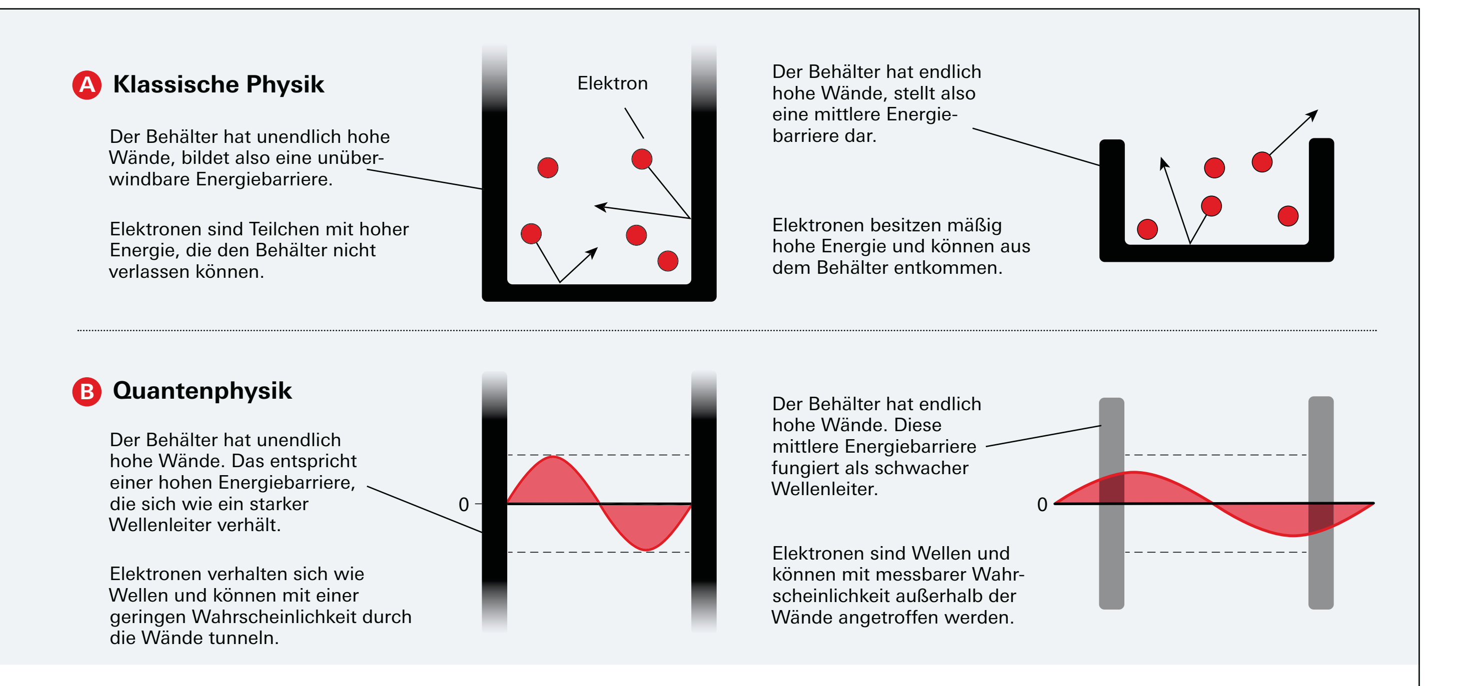
Polarfrontjetstream

Tiefdrucksystem

Rossby-Wellenmuster

Hochdrucksystem

ERDKUGELN: 5W INFOGRAPHICS, JETSTREAM-WELLEN UND GRAFIK OBEN: JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2019



Stürme treten in Resonanz

Große Rossby-Wellen und mit ihnen die Ausbuchtungen des Jetstreams können stoppen und eine stehende Welle ausbilden. Die Atmosphäre kann sich dann wie ein Wellenleiter verhalten (rote Linien). Dadurch treten die Wellen in Resonanz und werden immer größer, so dass sie zunehmend weiter nach Norden und Süden reichen. Die Wettersysteme verstärken sich dadurch und sitzen tagelang an Ort und Stelle fest. Im Sommer tritt dieses Phänomen öfter auf als im Winter.

Wellenleiter

intensive Druckzentren

Stehende Welle bildet Resonanz aus.

Tag der Zerstörung

Ein resonierender Jetstream saß zwischen Ende Juli und Anfang August 2018 fest und entfachte oder verstärkte Extremwetter rund um den Globus. Am 22. Juli erfassten Hitzewellen und Dürren mehrere Regionen und verschärften Waldbrände. Gleichzeitig hatten andere Gegenden mit starken Überschwemmungen zu kämpfen.

22. Juli 2018

Hitzewelle in Japan

Waldbrände in Kalifornien

Hitzewelle im Südwesten der USA

starke Überschwemmungen im Nordosten der USA

Hitzewelle in Skandinavien

Dürre in Mitteleuropa

Waldbrände in Griechenland

ERDKUGELN: 5W INFOGRAPHICS, JETSTREAM-WELLEN UND GRAFIK OBEN: JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2019

Die stehende Rossby-Welle ist dann im Hohlleiter gefangen, der an der nördlichen und südlichen Begrenzung nur minimal undicht ist – genau wie das Elektron im Behälter. In der Folge können die Ausschläge der Wellen durch Quasiresonanzverstärkung anwachsen. Dadurch entsteht eine riesige stehende Welle, die in ihren Wellenbergen und -tälern tagelang andauernde extreme Wetterlagen erzeugt. Die WKB-Approximation, die sich eigentlich auf Hohlleiterprobleme in der Quantenmechanik bezieht, hilft also auch, das Rossby-Hohlleiterproblem zu lösen.

Damit wird klar, wie der Klimawandel die stehenden Wellen beeinflusst, die uns anhaltende Wetterextreme bescheren. Petoukhov und seine Potsdamer Mitarbeiter bauten auf Karolys und Hoskins' Arbeit auf und zeigten 2014, dass Wellenleiterbedingungen für stehende Rossby-Wellen vor allem im Sommer entstehen. Denn zu dieser Jahreszeit manifestiert sich der Jetstream oft nicht als einziger, starker West-Ost-Wind, sondern alterniert vielmehr zwischen zwei Korridoren, die nördlicher beziehungsweise südlicher liegen als üblich.

Entspannung – aber nur bis 2050

Anhand der WKB-Approximation bewies Petoukhovs Gruppe, dass sich die Atmosphäre gerade unter diesen Bedingungen als Wellenleiter für Rossby-Wellen mit kurzen Wellenlängen verhalten kann. Deren Amplitude ist im Allgemeinen klein, ihre Biegungen schlängeln sich also nicht sehr weit nach Norden oder Süden. Sobald aber eine erste Kurve entsteht – beispielsweise, wenn eine Luftmasse, die sich von Westen nach Osten bewegt, auf die Rocky Mountains oder die Alpen trifft oder auf starke Temperaturunterschiede an der Grenze zwischen Land und Meer –, wachsen die Ausschläge der Rossby-Wellen durch den QRA-Mechanismus sehr schnell an.

Ob die Bedingungen für die Quasiresonanzverstärkung günstig sind, hängt größtenteils davon ab, wie sich die Temperaturunterschiede zwischen Nord und Süd in den tieferen Schichten der Atmosphäre gestalten. Klimamodelle geben diesen Zusammenhang gut wieder. Im Jahr 2017 haben meine Kollegen und ich nachgewiesen, dass QRA-Bedingungen in den letzten Jahrzehnten häufiger aufgetreten sind. Wie Klimasimulationen zeigen, werden steigende Treibhausgaskonzentrationen den Trend mit der Zeit weiter verstärken. Ebenso spielen natürliche Faktoren wie Schwankungen der Sonneneinstrahlung und Vulkanausbrüche sowie zusätzliche menschliche Einflüsse wie die Schwefeldioxidbelastung der Luft eine Rolle. Die Simulationen, CMIP5 genannt, haben mehr als 50 Forschungsgruppen weltweit für den jüngsten Bericht des Weltklimarats IPCC durchgeführt.

Übereinstimmend mit Temperaturaufzeichnungen an Wetterstationen kommen die Modelle zu dem Schluss, dass sich die Arktis durch den Klimawandel schneller erwärmt als der Rest der nördlichen Hemisphäre – ein Effekt, der als Arktische Verstärkung bekannt ist. Sinkt der Temperaturunterschied zwischen mittleren und polaren Breiten, wird aber der Jetstream insgesamt langsamer, was lang anhaltende Wetterlagen begünstigt und mit dem zwischen zwei Korridoren alternierenden Jetstream und der Quasiresonanzverstärkung in Verbindung gebracht wird.



GETTY IMAGES / SEAN GALLUP



GETTY IMAGES / SEAN GALLUP

Während der Hitzewelle im Sommer 2018 in Deutschland vertrockneten Sonnenblumen (oben), und ihre Samen verkümmerten (unten).

Dieser zunehmende Trend erklärt, warum sich ausdauernde sommerliche Wetterextreme in den letzten 20 Jahren auf der Nordhalbkugel häufen. Erst kürzlich haben Wissenschaftler bewiesen, dass QRA-Bedingungen mit einer Reihe von Extremwetterereignissen der vergangenen Jahre in Verbindung stehen: mit der europäischen Hitzewelle von 2003, den Waldbränden 2010 in Russland und den gleichzeitigen Überflutungen in Pakistan, der Dürre in Oklahoma und anderen Teilen der USA im Jahr 2011 sowie den kalifornischen Waldbränden 2015 und denen in Alberta im Jahr 2016. Die beispiellosen Waldbrände, die 2018 in Kalifornien wüteten, können wir dieser Liste nun hinzufügen. Der menschengemachte Klimawandel hat die Wahrscheinlichkeit für solche verheerenden Ereignisse in den jüngsten Jahrzehnten um rund 50 Prozent erhöht.

Einige Faktoren deuten darauf hin, dass extreme Wetterphänomene immer heftiger werden: So speichert beispielsweise eine wärmere Atmosphäre mehr Feuchtigkeit,

was zu stärkeren Regenfällen und Überschwemmungen führt. Und ein wärmerer Planet bedeutet häufigere, längere und intensivere Hitzewellen. Wie werden sich aber der stockende Jetstream und die Quasiresonanzverstärkung künftig auswirken?

Der berühmte Physiker Niels Bohr soll angemerkt haben, dass Vorhersagen schwierig sind, »vor allem, wenn sie die Zukunft betreffen«. In einer Studie haben meine Kollegen und ich 2018 analysiert, wie sich die QRA-Ereignisse infolge des prognostizierten Klimawandels wahrscheinlich ändern werden. Wir hatten erwartet, dass sich der bereits begonnene Trend unvermindert fortsetzen würde, kamen jedoch zu einem anderen Ergebnis.

Die IPCC- und CMIP5-Experimente bewerten die zukünftigen Bedingungen unter verschiedenen Annahmen: angefangen von einer umfassenden, sofortigen Senkung der Kohlendioxidemissionen bis hin zu einem Szenario, in dem der weltweite CO_2-Ausstoß weiterhin im selben Maß ansteigt wie bisher. Wir haben festgestellt, dass sich der Trend zu QRA-Bedingungen unter dem letzteren, dem so genannten »Business-as-usual-Szenario«, bis etwa 2050 abflachen wird. In der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts steigt er nach unseren Berechnungen jedoch schneller als bisher wieder an.

Wie wir herausgefunden haben, spielt dabei ein weiterer wichtiger, doch manchmal übersehener menschengemachter Klimafaktor eine Rolle: Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid, die durch Kohleverbrennung und andere industrielle Prozesse entstehen. Diese Schadstoffe bilden Partikel, so genannte Aerosole, die in der Atmosphäre umherfliegen, Sonnenstrahlung zurück in den Weltraum reflektieren und so die Erde kühlen.

Der paradoxe »Nutzen« der Luftverschmutzung

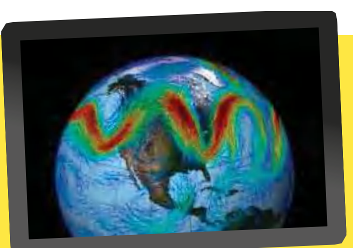
Die Aerosolbelastung war für sauren Regen im Nordosten der USA zwischen 1950 und 1970 verantwortlich. Der »Clean Air Act« legte fest, dass Gaswäscher in den Schornsteinen von Industrieanlagen installiert werden mussten, um das Schwefeldioxid aus den Abgasen zu entfernen. Während dies zur Rettung von Wäldern, Seen und Flüssen beitrug, gelangten auch weniger Sonnenlicht reflektierende Aerosole in die Atmosphäre. Ohne diese Partikel, die der Erwärmung durch den steigenden CO_2-Gehalt entgegenwirken konnten, heizte sich die Erde ab den 1970er Jahren schneller auf.

Viele Länder der Welt arbeiten jedoch noch immer mit veralteten industriellen Praktiken, allen voran China, das für fast die Hälfte der heutigen Kohleverbrennung verantwortlich ist. Im Business-as-usual-Szenario geht der Weltklimarat davon aus, dass Länder wie China weiterhin Kohle verbrennen und zu einem höheren CO_2-Ausstoß beitragen werden. Nach seinen Berechnungen würde der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre bis zum Ende des 21. Jahrhunderts dann mehr als das Dreifache des vorindustriellen Niveaus betragen. Ebenso nehmen die Experten in dem Szenario aber an, dass diese Industrien in den nächsten Jahrzehnten Gaswäscher installieren werden.

Dadurch wird der Anteil an Aerosolen bis zur Mitte des Jahrhunderts drastisch sinken und die Erde sich deutlich stärker erwärmen. Besonders wird dieser Effekt im Sommer in den mittleren Breiten zu bemerken sein, wenn die Sonneneinstrahlung maximal ist. In einigen Modellsimulationen erwärmen sich die gemäßigten Breiten sogar stärker als die Arktis. Dadurch nimmt die Arktische Verstärkung ab oder kommt ganz zum Erliegen. Folglich würde die Quasiresonanzverstärkung nicht mehr zunehmen, vielleicht sogar abnehmen – und das Jetstream-Muster, das den Extremsommern zu Grunde liegt, sich nicht noch weiter verstärken.

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Die 5 spannendsten Fragen zum Jetstream: **spektrum.de/wissen/jetstream/1647698**



NASA, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER

Doch dieser kurzfristige mildernde Effekt geht mit hohen langfristigen Kosten einher: Bis Mitte des Jahrhunderts werden die Aerosole weitgehend verschwunden sein. Von da an werden daher steigende Treibhausgaskonzentrationen die Temperaturen überall auf der Welt weiter in die Höhe treiben. Die Polarregion wird sich ab dann wieder schneller erwärmen als die mittleren Breiten. Die Arktische Verstärkung nimmt also erneut zu, und QRA-Ereignisse treten häufiger auf. Bis zum Jahr 2100 werden sie um rund 50 Prozent zunehmen. Auch hier zeigt sich der Wandel am deutlichsten im Sommer in den mittleren Breiten. Das ist insofern besonders beunruhigend, als dort die meisten Menschen leben und große Mengen an Nutzpflanzen wachsen, die starker Hitze größtenteils nicht gut standhalten können.

Einige Simulationen deuten sogar darauf hin, dass die Zahl an QRA-Ereignissen um mehr als das Dreifache steigen wird, andere wiederum sagen einen Rückgang vorher. Die Berechnungen unterscheiden sich hauptsächlich deshalb, weil die Klimamodelle Aerosole unterschiedlich behandeln. Ob sich die Prognosen mit der Zeit aneinander annähern werden, wissen wir noch nicht. Angesichts solcher Unsicherheiten und des enormen Risikopotenzials, das ein Worst-Case-Szenario mit sich bringt, ist es wohl am klügsten, die Verbrennung fossiler Brennstoffe und andere Aktivitäten, die die Treibhausgaskonzentrationen erhöhen, unverzüglich zu reduzieren. ◂

QUELLEN

Coumou, D. et al.: The influence of arctic amplification on mid-latitude summer circulation. Nature Communications 9, 2018

Mann, M.E. et al.: Influence of anthropogenic climate change on planetary wave resonance and extreme weather events. Scientific Reports 7, 2017

Mann, M.E. et al.: Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification. Science Advances 4, 2018

LIZ TORMES

KOHLENDIOXID
DAS KLIMAGAS VERGRABEN

Um die Folgen der globalen Erwärmung zu begrenzen, reicht es inzwischen nicht mehr, nur den Ausstoß von CO_2 zu reduzieren. Die Menschheit muss das Treibhausgas zusätzlich aktiv aus der Atmosphäre entfernen. Nun gilt es, unter den verschiedenen technischen Ansätzen den besten Mix zu finden.



Richard Conniff ist mehrfach ausgezeichneter US-amerikanischer Wissenschaftsautor zu biologischen und gesellschaftlichen Themen. Er lebt in Connecticut.

spektrum.de/artikel/1647848

LIZ TORMES

Um die Welt vor einem allzu dramatischen Klimawandel zu bewahren, schien es bis vor etwa einem Jahrzehnt, als würde es genügen, die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Man müsse fossile durch saubere Energiequellen ersetzen, Autos und Gebäude effizienter machen, auf LED-Beleuchtung wechseln, weniger Fleisch essen und so weiter. Die wichtigste Expertengruppe für solche Einschätzungen ist der auch Weltklimarat genannte IPCC (englisch für Intergovernmental Panel on Climate Change), ein zwischenstaatlicher Ausschuss der Vereinten Nationen, der regelmäßig den Wissensstand der Klimaforschung zusammenträgt. Noch 2005 hielt der IPCC die Strategie für ausreichend, Emissionen zu reduzieren und erneuerbare Energien zu fördern. Aber das hat nicht funktioniert – der globale CO_2-Ausstoß ist seither nicht gesunken, sondern gestiegen. Inzwischen helfen solche Maßnahmen allein nicht mehr, selbst wenn die jährlichen Nettoemissionen weltweit bis 2050 auf null fallen würden.

Die verheerenden wirtschaftlichen und ökologischen Folgen eines zu starken Klimawandels lassen sich Experten zufolge nur noch mit negativen Emissionen abwenden. Das bedeutet konkret: Jedes Jahr muss die Menschheit unter dem Strich Milliarden Tonnen Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen. Negative Emissionen in großem Maßstab sind inzwischen eine »biophysikalische Notwendigkeit«, so

AUF EINEN BLICK
BRINGT DEN KLIMAKILLER UNTER DIE ERDE!

1 Für das Ziel einer globalen Erwärmung um weniger als zwei Grad Celsius müssen bis zum Jahrhundertende eine Billion Tonnen bereits emittiertes Kohlendioxid wieder aus der Atmosphäre verschwinden.

2 Lösungsansätze reichen von der Aufforstung abgeholzter Wälder bis zu Maschinen, die CO_2 aus der Luft filtern und einlagern. Doch nicht bei allen ist klar, ob und wie gut sie umsetzbar sind.

3 Entscheidend wird die Suche nach der optimalen Kombination sein. Das jeweilige Potenzial liegt bestenfalls bei einigen hundert Milliarden Tonnen bis 2100, bei Kosten von bis zu 300 US-Dollar pro Tonne.



Diese Anlagen bei einem Geothermiekraftwerk im isländischen Hellisheiði pressen in Wasser gelöstes Kohlendioxid in poröse, tiefe Gesteinsschichten.



1

Eine Anlage saugt Luft an und entfernt Kohlendioxid daraus.

LIZ TORMES



LIZ TORMES

eine Studie von 2018 unter der Leitung von Jan Christoph Minx vom deutschen Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change.

Wie kommen wir dorthin? Die Zeit für eine Antwort drängt. Fast alle Nationen der Welt haben sich im Rahmen des Pariser Klimaabkommens von 2016 darauf geeinigt, deutlich unter einer globalen Temperaturerhöhung um zwei Grad Celsius über dem vorindustriellen Niveau zu bleiben. Das Ziel sind 1,5 Grad. Bei diesem Niveau gehen die Wissenschaftler davon aus, dass die Einschnitte in unser vertrautes Leben gerade noch nicht zu stark sind. Die Erwärmung liegt derzeit bereits bei etwa einem Grad und steigt mit 0,2 Grad pro Jahrzehnt. In einem Sonderbericht vom Oktober 2018 warnte der IPCC, dass wir nur bis 2030 Zeit hätten, um zu handeln. Sonst würden wir 1,5 Grad Celsius überschreiten.

Wohl und Wehe der Klimapolitik hängen am so genannten Kohlenstoffbudget. Das ist die Gesamtmenge von Kohlendioxid, die wir der Atmosphäre ab Beginn der Industrialisierung insgesamt hinzufügen können, ohne die Erwärmung über die kritische Temperatur hinauszutreiben. Bei den gegenwärtigen Emissionen – etwa 40 bis 50 Milliarden Tonnen pro Jahr – könnte es im 1,5-Grad-Szenario nur noch wenige Jahre dauern, warnte das Team um Minx 2018, bis jede weitere Tonne eine gleich große Entnahme erfordere. Nach Schätzungen der Forschergruppe muss die Welt bis 2100 zwischen 150 Milliarden und mehr als einer Billion Tonnen CO_2 aus der Atmosphäre entfernen. Das sind ab 2050 etwa zwei Milliarden bis 16 Milliarden Tonnen pro Jahr, wobei der Wert später im Jahrhundert deutlich zunimmt.

Dazu müssen wir ab 2030 mehrere hundert Anlagen zur Abscheidung und Speicherung von CO_2 pro Jahr bauen, führen die Wissenschaftler weiter aus. Das können etwa große Maschinen sein, die Kohlendioxid aus der Luft ziehen, oder Kraftwerke, die nachwachsende Biomasse verbrennen, während die Emissionen aufgefangen und tief unter der Erde eingelagert werden. Zu den technisch weniger aufwändigen Optionen gehören die Wiederaufforstung gerodeter oder die Erweiterung bestehender Wälder, die bessere Bindung von Kohlenstoff in Böden sowie das Zermahlen und großflächige Verteilen bestimmter Gesteinsarten, die CO_2 aufnehmen.

Die meisten der Hightech-Lösungen befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Sie erfordern enorme Investitionen bei erheblichen Risiken des Scheiterns und bei potenziellen Nebenwirkungen. Sie konkurrieren zudem um Land, das zur Ernährung der Menschen oder als naturnaher Lebensraum wichtig ist.

Für welche der Unterfangen wir uns auch entscheiden, sie dürften unser letzter Ausweg sein. Als der Statistiker Adrian Raftery von der University of Washington 2017 in einer Studie zum Klimawandel gemeinsam mit seinen Kollegen aktuelle Trends untersuchte, stellte er fest, dass wir – ohne Technologien für negative Emissionen – auf dem besten Weg sind, bis zum Ende des Jahrhunderts ein Plus von 3,2 Grad Celsius zu erreichen, bei einer Spanne zwischen 2 und 4,9 Grad. In einer weiteren Studie kategorisierte der Klimawissenschaftler Yangyang Xu von der Texas A&M University eine Erwärmung von mehr als drei Grad als »katastrophal« und von mehr als fünf Grad als »existenzielle Bedrohung für einen Großteil der Menschheit«.

Die Suche nach Rüstzeug vor einem Berg von Problemen

Wenn also eine Billion Tonnen negativer Emissionen in diesem Jahrhundert notwendig sind – welchen Anteil am Kuchen könnte jede Methode ausmachen und zu welchem Preis? Welcher Mix ist angesichts der Konkurrenz um bestimmte Ressourcen, zum Beispiel Landfläche, am besten geeignet? Und bringen wir den politischen Willen auf, negative Emissionen zu erreichen und gleichzeitig unseren derzeitigen Kohlendioxidausstoß drastisch zu senken?

Das Modell für eine Antwort auf zumindest eine der Fragen steht vielleicht auf Island vor den Toren von Reykjavík zwischen Felsbrocken und Moos. Inmitten der öden und eisigen Vulkanlandschaft saugt eine Maschine von der Größe einer Autogarage Luft durch einen Filter mit einem chemischen Absorber, der ihr Kohlendioxid entzieht. Sie wird mit Abwärme aus einem benachbarten Geothermie-



LIZ TORMES

2
In nahe gelegenen Kuppeln wird das Gas mehr als 700 Meter unter die Erde gepumpt. Dort reagiert es mit Basaltgestein zu Karbonaten.



LIZ TORMES

3
Diese Minerale sind als helle Stellen in einer Basaltprobe zu erkennen.

kraftwerk betrieben und pumpt das CO_2 gut 700 Meter tief unter die Erde. Dort reagiert das Gas mit Basaltgestein und verfestigt sich zu einem Mineral. Der Betreiber, das Schweizer Start-up-Unternehmen Climeworks, entreißt der Atmosphäre mit dieser Anlage bescheidene 50 Tonnen Kohlendioxid pro Jahr.

Eine solche direkte Abscheidung und Speicherung ist vielleicht der einfachste Weg zu negativen Emissionen. Turbinen schaufeln CO_2 aus dem Himmel und vergraben es regelrecht. Diverse Wissenschaftler meinen, die Technologie könne bis zum Ende des Jahrhunderts 10 bis 15 Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr entfernen, manche halten 40 Milliarden Tonnen für möglich. Die Aussicht ist unter Umständen sogar zu verlockend: Die Menschen könnten in der Hoffnung auf eine spätere technische Lösung die sofort gebotene Verringerung der Nutzung fossiler Brennstoffe verschleppen.

2018 hat Sabine Fuss vom Mercator Institute mit ihrem Team die Kosten, die Nebeneffekte, die Umweltverträglichkeit und weitere Faktoren sieben viel versprechender CO_2-Entfernungsmethoden gründlich untersucht. Fuss schätzt das bis 2050 aufgebaute Potenzial für die direkte Abscheidung und Speicherung etwas zurückhaltender ein – auf nur eine halbe bis fünf Milliarden Tonnen pro Jahr. In diesem Jahrhundert entspricht das insgesamt zwischen 25 und 250 Milliarden Tonnen, bei Kosten von 100 bis 300 US-Dollar pro Tonne. (Zum Vergleich: Ein einzelnes Auto stößt jährlich mehrere Tonnen Kohlendioxid aus.) Einige Forscher meinen, die Kosten ließen sich unter 100 Dollar pro Tonne drücken. Doch Minx befürchtet, bis dahin könne es zu spät sein. Dazu müsse man sich nur vor Augen führen, dass es für die Solarenergie mehr als 60 Jahre brauchte, um von der Anwendung bei Satelliten in den 1950er Jahren zur heutigen breiten Marktdurchdringung zu gelangen.

Zudem verbraucht die direkte CO_2-Abscheidung enorme Energiemengen. Die Entfernung von einer Million Tonnen Kohlendioxid pro Jahr – nur ein winziger Teil des Ziels von durchschnittlich 20 Milliarden Tonnen – würde ein 300- bis 500-Megawatt-Kraftwerk erfordern, so Jennifer Wilcox, Verfahrenstechnikerin am Worcester Polytechnic Institute. Ein Kohlekraftwerk würde dabei mehr Emissionen verursachen als entfernen. Solar- oder Windparks hingegen bedecken viel Land, das möglicherweise anderweitig benötigt wird.

Der rasche Bau solcher Anlagen wäre zwar vielleicht wichtig, um zügig Erfahrungen für zukünftige Projekte in einem viel größeren Umfang zu sammeln. »Aber würden Sie heute die direkte Entnahme von 20 Millionen Tonnen CO_2 aus der Luft forcieren, wäre Ihr Geld grundfalsch angelegt«, mahnt der Energietechnikforscher Roger Aines vom Lawrence Livermore National Laboratory. »Die dafür nötige Sonnen- und Windenergie sollte man besser direkt ans Netz bringen und dafür Kohlekraftwerke abschalten.« Neue Emissionen zu vermeiden, ist nach wie vor oberste Priorität.

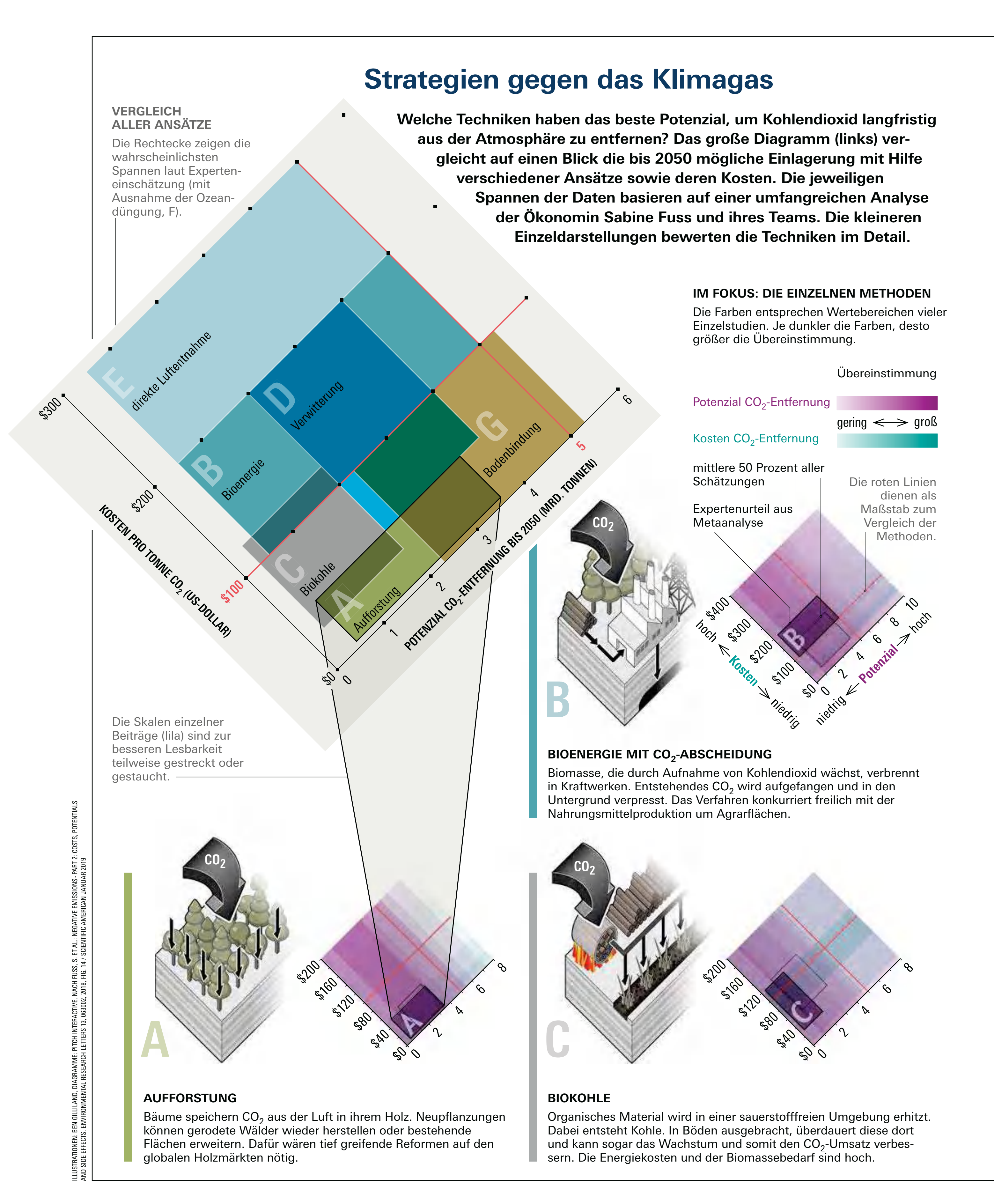
In ihrer Studie summiert Fuss nicht schlicht das Potenzial der sieben untersuchten Methoden auf, denn einige von ihnen konkurrieren um die gleichen Ressourcen. So würde beispielsweise Aufforstung eventuell Land beanspruchen, das für den Anbau des Brennstoffs für Bioenergiekraftwerke benötigt wird. Bioenergie wiederum könnte für die unterirdische Speicherung des entstehenden CO_2 Lagerstätten benötigen, die dann nicht mehr für die direkte Abscheidung aus der Atmosphäre verfügbar wären. Wissenschaftler zielen deswegen auf ein optimiertes Portfolio verschiedener Methoden ab.

Für den Anfang rät Peter Smith, Experte für Bodennutzung an der University of Aberdeen in Schottland, bereits bekannte Verfahren hochzuskalieren: »Wir wissen, wie man Bäume pflanzt. Wir wissen, wie man Moore renaturiert, vor allem durch Anheben des Grundwasserspiegels.« Torf bindet Kohlendioxid. »Wir wissen, wie man den Kohlenstoffgehalt im Boden erhöht. Das alles ließe sich relativ einfach und unmittelbar umsetzen. Und es brächte uns immerhin einen Schritt in die richtige Richtung.«

Eine viel versprechende Strategie ist die Wiederaufforstung. Traurigerweise sind die Regenwälder der Erde heute eher eine Quelle denn eine Senke für Kohlendioxid, weil Bäume gefällt oder verbrannt werden und verwüstete Flächen zurückbleiben. Die Wälder der Welt wieder zu Gebieten mit negativen Emissionen zu machen, würde tief grei-

Strategien gegen das Klimagas

Welche Techniken haben das beste Potenzial, um Kohlendioxid langfristig aus der Atmosphäre zu entfernen? Das große Diagramm (links) vergleicht auf einen Blick die bis 2050 mögliche Einlagerung mit Hilfe verschiedener Ansätze sowie deren Kosten. Die jeweiligen Spannen der Daten basieren auf einer umfangreichen Analyse der Ökonomin Sabine Fuss und ihres Teams. Die kleineren Einzeldarstellungen bewerten die Techniken im Detail.



BIOENERGIE MIT CO_2-ABSCHEIDUNG

Biomasse, die durch Aufnahme von Kohlendioxid wächst, verbrennt in Kraftwerken. Entstehendes CO_2 wird aufgefangen und in den Untergrund verpresst. Das Verfahren konkurriert freilich mit der Nahrungsmittelproduktion um Agrarflächen.

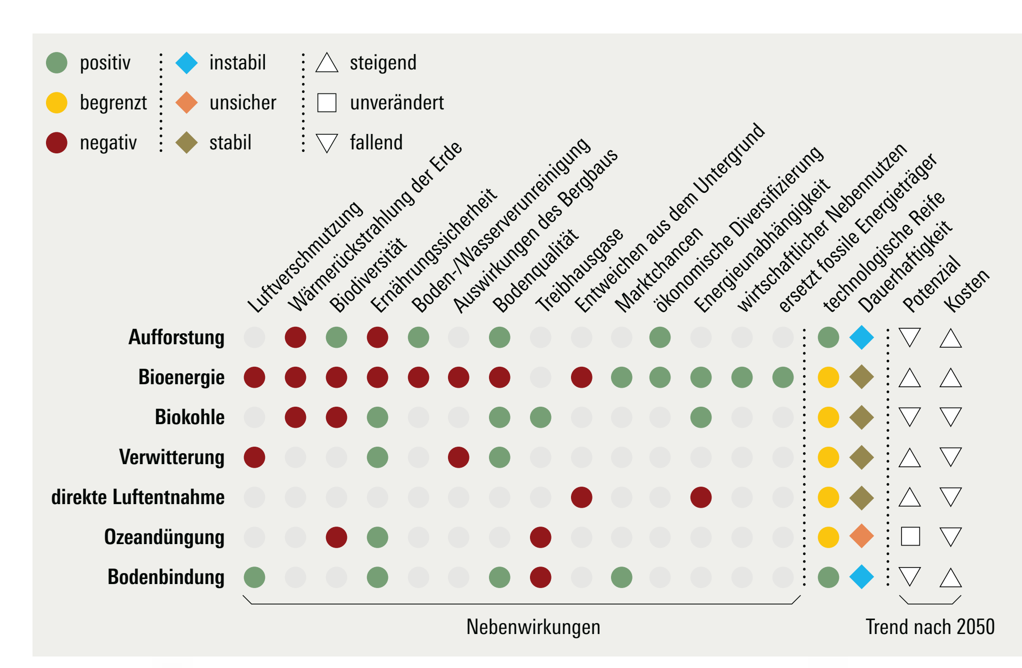
AUFFORSTUNG

Bäume speichern CO_2 aus der Luft in ihrem Holz. Neupflanzungen können gerodete Wälder wieder herstellen oder bestehende Flächen erweitern. Dafür wären tief greifende Reformen auf den globalen Holzmärkten nötig.

BIOKOHLE

Organisches Material wird in einer sauerstofffreien Umgebung erhitzt. Dabei entsteht Kohle. In Böden ausgebracht, überdauert diese dort und kann sogar das Wachstum und somit den CO_2-Umsatz verbessern. Die Energiekosten und der Biomassebedarf sind hoch.

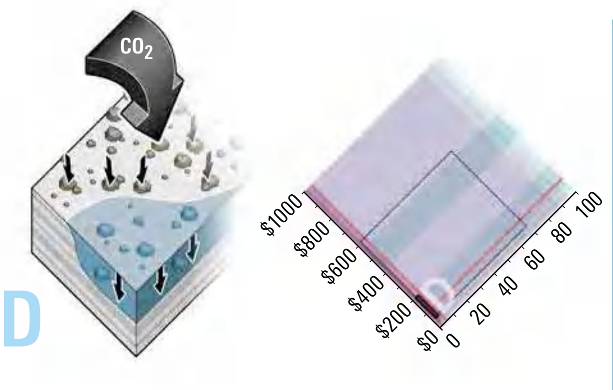
ILLUSTRATIONEN: BEN GILLILAND. DIAGRAMME: PITCH INTERACTIVE, NACH FUSS, S. ET AL.: NEGATIVE EMISSIONS – PART 2: COSTS, POTENTIALS AND SIDE EFFECTS. ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS 13, 063002, 2018, FIG. 14 / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019



PRO UND KONTRA

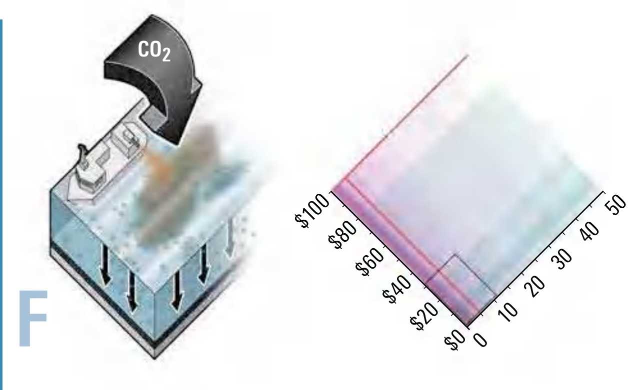
Die Methoden, mit denen bis 2050 Kohlenstoff gebunden werden könnte, haben mögliche positive wie negative Nebenwirkungen (linke Spalten). Die Spalte »technologische Reife« zeigt die praktische Umsetzbarkeit an, die Spalte »Dauerhaftigkeit« bezieht sich auf das Risiko, dass CO_2 wieder entweicht. Die rechtesten beiden Spalten stellen das anzunehmende Potenzial und die Kosten für eine weitere Ausweitung der Techniken nach 2050 dar. Hier spielt beispielsweise die begrenzte Landfläche eine Rolle. Die Beurteilung richtet sich nach der überwiegenden Einschätzung in wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Gibt es nicht genügend davon, bleiben einzelne Einträge unausgefüllt.

PITCH INTERACTIVE / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019



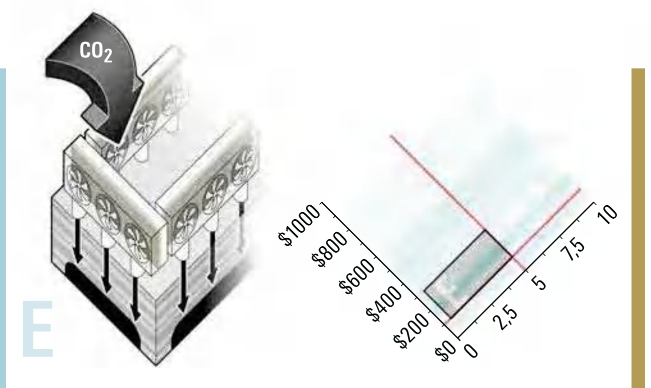
BESCHLEUNIGTE VERWITTERUNG

Bestimmte Gesteinsarten werden abgebaut, pulverisiert und auf dem Land oder im Ozean ausgebracht. Dort reagieren sie mit CO_2 und wandeln sich in Karbonate um. Größtes Hemmnis sind die Kosten für die Förderung, Zerkleinerung und Verteilung.



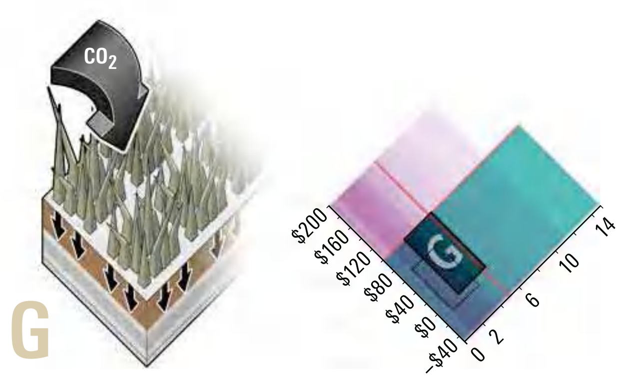
OZEANDÜNGUNG

Eisenspäne im Oberflächenwasser der Ozeane könnten das Wachstum von Algen beschleunigen, die CO_2 aufnehmen und nach ihrem Absterben zu Boden sinken. Wegen unklarer Auswirkungen auf die marinen Ökosysteme wurde die Methode von den Experten nicht weiter einbezogen.



DIREKTE LUFTENTNAHME

Große Maschinen saugen Luft aus der Atmosphäre ein, entfernen chemisch CO_2 und pumpen dieses tief in die Erde. Die Kosten sind anfangs hoch, könnten aber mit Weiterentwicklung der Technik sinken. (Daten für eine Darstellung des Potenzials fehlen.)



KOHLENSTOFFBINDUNG IN BÖDEN

Das Wurzelwerk geeigneter Gräser und anderer Pflanzen befördert verstärkt Kohlenstoff unter die Erde, wo er infolge angepasster landwirtschaftlicher Praktiken verbleibt. Das zusätzliche Speichervermögen der Böden ist jedoch begrenzt.

ILLUSTRATIONEN: BEN GILLILAND, DIAGRAMME: PITCH INTERACTIVE, NACH FUSS, S. ET AL.: NEGATIVE EMISSIONS - PART 2: COSTS, POTENTIALS AND SIDE EFFECTS. ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS 13, 063002, 2018, FIG. 14 / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019


GETTY IMAGES / JEFF HUTCHENS

Biokohle wird aus Pflanzenmaterial hergestellt. In dieser Form kann Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzte Flächen eingebracht werden. Sie erhöht die Bodenqualität und wird dort praktisch nicht abgebaut.

fende Reformen im internationalen Holzmarkt erfordern, der stark vom illegalen Handel beeinflusst wird. Darüber hinaus wären Flächen für die Wiederaufforstung geeignet, die für die Land- oder Weidewirtschaft gerodet worden sind und später als unrentabel aufgegeben wurden. Ausreichende Mittel vorausgesetzt, könnte die Wiederherstellung von fünf Millionen Quadratkilometern solcher Areale 3,7 Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr binden, so eine Studie von 2015 unter der Leitung von Richard Houghton von der Forschungsorganisation Woods Hole Research Center. Würden sogar alle Weideflächen, die früher einmal Wälder waren, konsequent in ihren Ursprungszustand zurückversetzt, könnten dem Ökologen Bronson Griscom von der Naturschutzorganisation The Nature Conservancy zufolge bis zu zehn Milliarden Tonnen negative Emissionen pro Jahr entstehen. Das ist bereits ein beträchtlicher Teil der insgesamt nötigen Rückgewinnung von Kohlenstoff. Aber dieser Schritt würde global gesehen eine Abkehr vom Fleischkonsum erfordern – entgegen dem Trend.

Fuss erkennt in der Aufforstung nicht ganz so viel Potenzial. Bäume leben und sterben, sie geben den gespeicherten Kohlenstoff also später in diesem oder im nächsten Jahrhundert wieder ab. Die Menge des jährlich eingelagerten Kohlendioxids wird wahrscheinlich allmählich auch zurückgehen, weil alte Wälder langsamer wachsen. Und Risiken durch Waldbrände, erneute Rodung und direkte Auswirkungen des Klimawandels bleiben bestehen. Dennoch könnte die Vergrößerung von Wäldern die Zeit entscheidend überbrücken, bis technische Lösungen im großen Stil einsetzbar werden. Fuss hält bis Mitte des Jahrhunderts 0,5 bis 3,6 Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr für möglich. Das könnte 25 Milliarden bis 180 Milliarden Tonnen zum Gesamtziel von einer Billion Tonnen in diesem Jahrhundert beitragen. Die Kosten lägen wohl zwischen 5 und 50 Dollar pro Tonne.

Auch ließe sich das Waldmanagement auf möglichst optimalen Kohlenstoffeintrag umstellen. Laut Griscom ernten zum Beispiel Förster im Südosten der USA Kiefern mehrere Jahre vor dem Zeitpunkt, der unter dem Gesichtspunkt der CO_2-Speicherung am besten wäre. Wenn Waldbesitzer die Möglichkeit hätten, Zertifikate zu verkaufen, um den entgangenen Ertrag während der zusätzlichen Wachstumsjahre zu kompensieren, könnte dies die Ernte hinauszögern und insgesamt mehr Kohlenstoff in den Wäldern halten.

Ebenso könnte der Anbau von Stickstoff bindenden Pflanzen und ein anderes System der Weideführung die Beweidung produktiver machen und gleichzeitig die Kohlenstoffspeicherung in den Böden erhöhen. Fuss schätzt konservativ, dass Verbesserungen hier bis zu 5,3 Milliarden Tonnen pro Jahr ausmachen können – 265 Milliarden Tonnen in diesem Jahrhundert –, bei 0 bis 100 Dollar pro Tonne.

Dazu kommt so genannte Biokohle. Dabei erhitzt ein spezieller Ofen Biomasse in einer sauerstoffarmen Umgebung. Es entstehen Holzkohle und technisch nutzbare Nebenprodukte wie Öl und Gas. Wenn die Kohle in landwirtschaftliche Flächen eingebracht wird, bleibt der Kohlenstoff im Boden und kann sogar die Ernteerträge verbessern. Obwohl das noch niemand in großem Maßstab versucht hat, halten Fuss und ihre Koautoren das Verfahren für eine plausible Möglichkeit, 300 Millionen bis zwei Milliarden Tonnen Kohlendioxid pro Jahr einzulagern, bei Kosten von 90 bis 120 Dollar pro Tonne. Das sind 15 Milliarden bis 100 Milliarden Tonnen in diesem Jahrhundert.

Zu Lande, zu Wasser und aus der Luft

Ein weiterer Ansatz ist Bioenergie mit CO_2-Abscheidung und -Speicherung, kurz BECCS. Die Pläne vieler Länder zur Erfüllung ihrer Pariser Verpflichtungen hängen daran, doch die Technik ist umstritten: Ein Kraftwerk verbrennt Holz, landwirtschaftliche Abfälle oder andere Biomasse. Die Organismen haben der Atmosphäre während ihres Wachstums Kohlendioxid entzogen. Im Kraftwerk wird es zwar wieder freigesetzt, aber aufgefangen und unterirdisch in tiefe geologische Formationen zur endgültigen Speicherung verpresst. Allerdings beansprucht die Bepflanzung in dem von einigen Befürwortern vorgeschlagenen Umfang viel Ackerfläche und konkurriert mit der Nahrungsmittelproduktion, mit natürlichen Lebensräumen sowie mit anderen Speichermethoden wie der Wiederaufforstung. Die Emissionen am Schornstein anzuzapfen, reduziert zudem den Wirkungsgrad des Kraftwerks. Daher schätzt Fuss das Potenzial von BECCS auf nur zwei Milliarden Tonnen pro Jahr und liegt damit deutlich unter den Prognosen anderer Forscher. Die Kosten lägen bei 100 bis 200 Dollar pro Tonne. Bis 2100 wären so 100 Milliarden Tonnen negative Emissionen möglich.

Ein viel diskutiertes Verfahren beschleunigt einen natürlichen Verwitterungsprozess: Kohlendioxid in der Luft reagiert mit bestimmten Gesteinen wie Basalt zu festen Verbindungen. Forscher wollen Felsen regelrecht zermahlen, um durch die dergestalt vergrößerte Oberfläche die chemische Umwandlung deutlich zu beschleunigen. Fuss schätzt das Potenzial auf zwei bis vier Milliarden Tonnen pro Jahr, bei Kosten von 50 bis 200 Dollar pro Tonne.

Gelegentlich wird über die Düngung der Ozeane nachgedacht. Eisen oder sonstige ins Meer eingebrachte Stoffe sollen das Wachstum von Algen und anderem Plankton stimulieren. Doch das wäre wohl nicht nur ineffizient und

von kurzer Dauer, sondern hätte unabsehbare Auswirkungen auf die Ökosysteme. Es sei daher »keine praktikable Strategie für negative Emissionen«, schreibt das Team um Fuss.

Was bleibt unter dem Strich? Die Spanne der aufsummierten Effekte liegt zwischen 150 Milliarden und etwas mehr als eine Billion Tonnen bis 2100. Der letzte Wert mag Hoffnungen wecken, aber wir dürfen die Zahlen wegen der konkurrierenden Ressourcen nicht einfach addieren. Fuss zufolge können wir bestenfalls das Portfolio optimieren und vorteilhafte Überschneidungen nutzen. So wäre beispielsweise die beschleunigte chemische Verwitterung auf den gleichen Flächen möglich, auf denen Biomasse für BECCS angebaut wird.

Jedenfalls erfordern alle Ansätze massive Investitionen in Forschung und Entwicklung. »Das wird ein langer, harter Kampf«, meint Roger Aines. Die Regierungen zögern bei konkreten Finanzierungsentscheidungen, auch weil sie unsicher sind, auf wen sie setzen sollen, und weil einige frühere Investitionen bereits zu berüchtigten Misserfolgen geführt haben. Das US-Energieministerium hat etwa riesige Summen für Projekte ausgegeben, die auf »saubere Kohle« durch Abscheidung der Verbrennungsprodukte bei der Stromerzeugung abzielten. Doch das Energieunternehmen Southern Company beendete seine 7,5 Milliarden Dollar teuren Versuche 2017 und stellte das entsprechende Kohlekraftwerk in Kemper County in Mississippi auf Erdgas um.

Eine CO_2-Steuer böte einen Ausweg aus der Verlegenheit, vorzeitig gewissermaßen die Gewinner des Technikwettrennens zu küren. Sie würde jede Emission von Kohlendioxid direkt mit Kosten belegen. Der Gedanke dahinter ist, einen Markt dafür zu schaffen, sowohl jetzt den Ausstoß zu reduzieren als auch einmal in die Atmosphäre gebrachtes CO_2 später zurückzugewinnen. Mehrere Staaten haben so ein System bereits eingeführt, meist im Bereich von 20 Euro pro Tonne. In den Volkswirtschaften, die stark von fossilen Brennstoffen abhängen, schrecken die Regierungen vor einer drastischen Besteuerung jedoch oft zurück.

Bis auf wenige Ausnahmen zögern die Unternehmen außerdem, in Speichertechnologien zu investieren, da sie bis vor Kurzem keinen Markt dafür sahen. Schließlich ist die Klimarettung ein öffentlicher Nutzen, mit dem man keinen Gewinn erzielen kann. Aber das könnte sich ändern. So hat das US-Repräsentantenhaus Anfang 2018 ein überraschend überparteiliches Paket von Steueranreizen verabschiedet. Unternehmen sollen Vergünstigungen für die Abscheidung von Kohlendioxid, die Lagerung unter Tage – bis zu 50 US-Dollar pro Tonne – und für verschiedene Formen der Nutzung von CO_2 erhalten. Darunter ist das umstrittenste Einsatzgebiet die »tertiäre Ölgewinnung«. Hier kauft eine Ölgesellschaft Kohlendioxid, transportiert es per Pipeline und presst es in eigentlich erschöpfte Quellen. Das setzt wiederum Ölreste frei, die sich mit herkömmlichen Mitteln nicht mehr fördern ließen. Die Gewinnung fossiler Brennstoffe als Folge des Kampfs gegen den Klimawandel klingt widersinnig und hat das Steuerprogramm bei Kritikern als eine versteckte Subvention fossiler Brennstoffe in Verruf gebracht. Doch einige Umweltschützer begrüßen den Perspektivenwechsel: Kohlendioxid wird so zu einem Produkt, das sinnvoll gehandelt werden kann, und ist nicht nur ein Kostenfaktor.

Bringt uns das Portfolio potenzieller Techniken zusammen mit Steueranreizen und Marktmechanismen zum Ziel von einer Billion Tonnen bis 2100? Der extrem trockene Sommer 2018 könnte aufgerüttelt haben. Auf vier Kontinenten erlebten die Menschen Hitze und Dürre. Der US-amerikanische Westen stand in Flammen. In Japan kamen innerhalb einer Woche Tausende von Hitzschlagopfern ins Krankenhaus. In Deutschland kürte die Gesellschaft für deutsche Sprache »Heißzeit« zum Wort des Jahres. Klimawissenschaftler warnten vor einem unkontrollierbaren »Treibhaus Erde«, so etwa Hans Joachim Schellnhuber, emeritierter Direktor des deutschen Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung. Er umriss vor Reportern das Szenario einer Welt, die nur noch Lebensraum für eine Milliarde statt heute 7,5 Milliarden Menschen bieten könnte.

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Lesen Sie über erschöpfte Erdgasfelder als CO_2-Endlager unter **spektrum.de/artikel/1644768**



MUTLU KURTBAS / GETTY IMAGES / ISTOCK

Politische Entscheidungsträger scheinen dem Klimawandel trotz überwältigender Beweise immer noch unentschlossen gegenüberzustehen. Das Beunruhigende an CO_2-Speichertechnologien ist, dass hier selbst für die Wissenschaftler vieles ungewiss ist. Zum Kohlenstoff in Böden meint die Ökologin Stephanie Roe von der University of Virginia etwa: »Wir diskutieren verschiedene Substrate und dass es darauf ankommt, in welchem Teil der Welt man sich befindet, wie die Niederschläge dort aussehen und welche Temperaturen herrschen.« Forscher streiten sogar darüber, ob sich irgendeine der Methoden zur Entfernung von Kohlenstoff, geschweige denn alle, überhaupt bis zu Milliarden Tonnen jährlich hochskalieren lässt. »Vielleicht dreht sich in der Debatte zu viel um die mögliche Dimension«, kommentiert Brendan Jordan vom Great Plains Institute in Minneapolis. »Ich fürchte, das lähmt uns, und das können wir uns nicht leisten.« Wir müssen auf negative Emissionen setzen, trotz aller Unsicherheiten. Denn diese sind winzig im Vergleich zur Ohnmacht in einer Welt, auf der das Klima mit uns »Reise nach Jerusalem« spielt und auf der es, sobald die Musik zu spielen aufhört, für Milliarden Menschen keinen Platz mehr gibt, sich hinzusetzen. ◂

QUELLEN

Fuss, S. et al.: Negative emissions – Part 2: Costs, potentials and side effects. Environmental Research Letters 13, 2018

Griscom, B.W. et al.: Natural climate solutions. PNAS 114, 2017

Mulligan, J. et al.: Technological carbon removal in the United States. World Resources Institute, 2018



FREISTETTERS FORMELWELT
BEHARRLICHE BERECHNUNGEN

Mathematiker brauchen Ausdauer. Manchmal dauert es Jahrzehnte, bis man endlich einen Beweis findet. Aber auch Zahlen können hartnäckig sein!

Florian Freistetter ist Astronom, Autor und Wissenschaftskabarettist bei den »Science Busters«.

▸▸ spektrum.de/artikel/1647842

Quersummen von Zahlen sind nicht nur leicht zu berechnen, sondern haben auch ganz praktische Anwendungen. Bis 2006 war zum Beispiel die Summe der zehn Ziffern einer Internationalen Standardbuchnummer (ISBN) immer restlos durch elf dividierbar. Die Quersumme zeigte also schnell, ob eine ISBN gültig ist oder nicht. Inzwischen werden nur noch 13-stellige ISBN vergeben, die sich ebenfalls durch eine allerdings komplexere Berechnung rasch überprüfen lassen.

Ein ähnlich einfaches Konzept wie die Quersumme ist das Querprodukt. Auch wenn sich dafür weniger konkrete Anwendungsfälle ergeben, ist es vom mathematischen Standpunkt aus dennoch recht interessant. Ein Beispiel ist die Rechnung:

$$153 \longrightarrow 1 \cdot 5 \cdot 3 = 15 \longrightarrow 1 \cdot 5 = 5$$

Analog zur Quersumme bildet man aus den Ziffern der Zahl ein Produkt. Das wiederholt man immer wieder, bis man schließlich bei einer einzelnen Ziffer landet. Die Anzahl der dafür nötigen Schritte (im obigen Beispiel 2) wird als »Beharrlichkeit« der Ausgangszahl bezeichnet, und das Endergebnis (5) heißt »multiplikative Ziffernwurzel«.

Offensichtlich ist 10 die kleinste positive Zahl, bei der sich ein Querprodukt bilden lässt. Damit ist sie auch die kleinste Zahl, deren Beharrlichkeit 1 beträgt. Beharrlicher ist erst die 25, und 39 ist die kleinste Zahl mit einer Beharrlichkeit von 3 ($3 \cdot 9 = 27$, $2 \cdot 7 = 14$, $1 \cdot 4 = 4$). Sucht man nach noch beharrlicheren Zahlen, stellt man fest, dass sie sehr schnell sehr groß werden. Die kleinste Zahl, bei der man 10 Schritte braucht, bis die multiplikative Ziffernwurzel übrig bleibt, ist 3 778 888 999, während eine Beharrlichkeit von 11 erstmals bei 277 777 788 888 899 auftaucht.

Überraschenderweise ist bisher noch nicht bekannt, ob es eine Beharrlichkeit von 12 oder mehr überhaupt gibt. Mathematiker vermuten, dass das nicht der Fall ist – das haben sie mit aufwändiger Computerunterstützung für enorm viele Zahlen geprüft. Wenn also doch Zahlen mit einer Beharrlichkeit von mehr als elf existieren sollten, dann müssen sie extrem groß sein.

Eine konkrete Anwendung ist aus diesem Forschungsgebiet noch nicht entstanden, weshalb die Beschäftigung mit der Beharrlichkeit von Zahlen nutzlos wirken mag. Tatsächlich erscheinen viele Aufsätze zu diesem Thema in einer Zeitschrift des Titels »Journal of Recreational Mathematics«. Es handelt sich also um Mathematik, die der Unterhaltung und Erholung dient. Diesen Zweck sollte man aber keinesfalls unterschätzen!

Als Astronom ist mir mehr als deutlich bewusst, was unterhaltsame Wissenschaft leisten kann. Nacht für Nacht packen überall auf der Welt Menschen ihre Teleskope aus und beobachten damit den Himmel. Das tun sie nicht, um astronomische Forschung zu betreiben, sondern einzig und allein aus Spaß an der Betrachtung des Kosmos. Die Hobbyastronomie ist für ihre Anhänger ebenso erholsam wie für andere ein Kinobesuch oder sportliche Aktivität.

Auch wenn die Mathematik oft in ihrer eigenen abstrakten Welt existiert, kann sie dennoch genauso als Entertainment dienen. Und genau diese Art von »Unterhaltungsmathematik« ist es, die Menschen für Forschung und Wissenschaft begeistert, so dass sie eine wichtige gesellschaftliche Aufgabe erfüllt.

KLOSTERMEDIZIN
VON MONTE CASSINO NACH BINGEN

Benedikt von Nursia legte den Grundstein der klösterlichen Heilkunde, die in Hildegard von Bingen ihre wohl eigenwilligste Vertreterin fand. Jahrhundertelang oblag es Geistlichen, das medizinische Wissen der Antike zu bewahren und zum Wohl der Patienten zu erweitern.


PETRA ROTHÜTL


PETER RAIDER

Dieser Artikel war als gemeinsamer Beitrag des Medizinhistorikers **Tobias Niedenthal** (links) von der Forschergruppe Klostermedizin in Würzburg und des Medizin- und Pharmaziehistorikers **Johannes Gottfried Mayer**, dem Leiter der Gruppe, geplant. Mayer verstarb unerwartet im März 2019. Der Artikel ist seinem Gedenken gewidmet.

spektrum.de/artikel/1647248

Dass das Mittelalter in gesellschaftlicher wie wissenschaftlicher Hinsicht eine Epoche der Finsternis war, ist ein weit verbreitetes Klischee. Im 17. Jahrhundert ersonnen, um die Leistungen der eigenen Gegenwart durch den Kontrast zur düsteren Vergangenheit noch strahlender erscheinen zu lassen, prägte es unser Bild jener Zeit – auch in der Forschung. Beispielsweise sprach der Medizinhistoriker Julius Pagel, ein Pionier seines Fachs, um 1900 abwertend von einem Jahrtausend der Stagnation. Nur zögerlich gewannen Historiker ein differenzierteres Bild und trennten Fakten von Vorurteilen. 1964 bezeichnete der Heidelberger Arzt und Historiker Heinrich Schipperges das frühe und hohe Mittelalter als eigenartigste Epoche in der Geschichte der abendländischen Medizin und charakterisierte sie als Zeit ohne Universitäten, in der sich in Europa nur Benediktiner auf die Heilkunde verstanden, als »Zeitraum, den man deshalb auch als Epoche der Klostermedizin oder als Zeitalter der Mönchsärzte bezeichnet hat«.

Zum Klischee der allgemeinen Düsternis gesellte sich ab dem ausgehenden 18. Jahrhundert im Hinblick auf die gesellschaftlichen Aspekte noch ein romantisch verklärtes Bild, geprägt von Burgen und edlen Rittern, Minneliedern und Heldensagen. Und auch zum Negativbild der stagnierenden Klostermedizin existierte ein solcher Gegenentwurf: Hildegard von Bingen (1098–1179). Dank der polnisch-französischen Ärztin Mélanie Lipinska (1865–1933) avancierte die Äbtissin zunächst zur Ikone der Frauenbewegung, da sie es verstanden hatte, sich in einer Welt der Männer bis in höchste Kreise Respekt zu verschaffen. Schließlich schrieb Lipinska ihr sogar die Kenntnis des Blutkreislaufs wie auch der Gravitation zu. Zur Erinnerung: Als nachweislich Erster beschrieb der Londoner Arzt William Harvey den Blutkreislauf 1616 in seinen Vorlesungen, und gut 70 Jahre später formulierte der britische Naturforscher Isaac Newton das Gravitationsgesetz. Wie konnte ihnen eine Nonne des 12. Jahrhunderts zuvorgekommen sein? Lipinskas Schlussfolgerung lautete: Ein solches Wissen musste Gott geschenkt haben – Hildegard war schon zu Lebzeiten für ihre Visionen berühmt.

Ihre heutige Popularität verdankt sie aber vor allem dem österreichischen Arzt Gottfried Hertzka, der seine angeblich auf den Werken der Äbtissin basierte »Hildegard-Medizin« ab 1970 Gewinn bringend vermarktete (siehe Bild S. 76). Auch er postulierte einen visionären Ursprung ihrer Natur- und Heilkunde; sie sei die »Sekretärin des Heiligen Geistes« gewesen. Von Anweisungen zur richtigen Ernährung und Rezepten für die Behandlung diverser Krankheiten ganz abgesehen habe die Nonne bereits von Viren, Blutgruppen,

Hildegard von Bingen empfängt eine Inspiration Gottes. Diese einzige zeitgenössische Darstellung der Äbtissin entstammt ihrer ersten visionären Schrift, der »Scivias«. Das Original ist durch Fotografien erhalten.



Ecce quadra-
gesimo tercio
temporalis cur-
sus mei anno
cum celesti uisi-
oni magno ti-
more ⁊ tremu-
la intentione inhererem uidi maxi-
mũ splendorẽ. in quo facta ẽ uox
de celo ad me dicens. O homo fragi-
lis ⁊ cinis cineris ⁊ putredo putredi-
nis. dic ⁊ scribe q̄ uides ⁊ audis. Sed
quia timida es ad loquendũ ⁊ simplex
ad exponendum ⁊ indocta ad scriben-
dum ea. dic ⁊ scribe illa nõ scd̃m os homi-
nis. nec scd̃m intellectum humane ad-
inuentionis nec scd̃m uoluntatẽ huma-
ne compositionis. s; scd̃m id quod ea in
celestib' desup in mirabilib' di uides ⁊ au-
dis. ea sic edisserendo pferens. quemadmo-
dum ⁊ auditor uerba pceptoris sui pcipi-
ens. ea scd̃m tenorẽ locutionis illi'. ipso uo-
lente. ostendente. ⁊ pcipiente ppalat. Sic
ḡ ⁊ tu o homo. dic ea q̄ uides ⁊ audis. ⁊ scri-
be ea non scd̃m te. nec scd̃m aliũ homi-
nem. s; secundũ uoluntatẽ scientis uiden-
tis ⁊ disponentis omnia in secretis miste-
riorum suorum. Et iterũ audiui uocẽ
de celo michi dicentẽ. Dic ḡ mirabilia
hec. ⁊ scribe ea hoc modo edocta ⁊ dic.

Factum ẽ in millesimo centesimo
quadragesimo p̄mo filii di ihũ xp̄i
incarnationis anno. cũ q̄draginta duoꝝ
annoꝝ septẽq; mensium eẽm maxime corusca-
tionis igneũ lum̃ apto celo ueniens totũ
cerebrũ meũ tnsfudit. ⁊ totũ cor totũq;
pectus meũ uelut flamma nõ tam ar-
dens s; calens ita inflammauit. ut sol
rem aliquam calefacit. sup quam radi-
os suos ponit. Et repente intellectum
expositionis libroꝝ uidelicet psalterii
euuangelii ⁊ alioꝝ catholicoꝝ tam ue-
teris quam noui testamenti uolumi-
num sapiebam. nõ autẽ interpretatio-
nem uerboꝝ textus eoꝝ nec diuisionẽ

Hormonen und Tumorerkrankungen gewusst. »Nach Millionen intensiver Forschungsstunden der gelehrtesten Männer, der raffiniertesten biologischen Apparate und Messmethoden« erahnten Ärzte allmählich, »was Hildegards himmlisches Medizinprogramm an tiefgründigster Kenntnis über Gesundheit und Krankheit enthält«. Freilich entsprach eine solche Wertschätzung hildegardscher Erkenntnisse durch die moderne Medizin nur Hertzkas Wunschdenken.

Gleichwohl ist die Nonne in der Alternativmedizin und in esoterisch interessierten Kreisen sehr populär. Im Buchhandel tummeln sich Ratgeber in Sachen Naturapotheke, Gärtnern, Kochen, Fasten, Kindererziehung und Psychotherapie. Der von ihr angeblich propagierte Dinkel bereichert die Produktpalette der Bäckereien.

Im Rückblick erwies sich die Äbtissin somit einerseits als Segen für die Erforschung der Klostermedizin, warf ihre Person doch ein strahlendes Licht auf das angeblich finstere Mittelalter. Andererseits hat die Hildegard-Medizin wenig mit Hildegards Werken zu tun. Lipinksa unterließ es, ihre Zuschreibungen durch Verweise auf Textstellen zu belegen, Herztka ignorierte die in den 1950er Jahren von Schipperges und Peter Riethe, Emeritus der Universität Tübingen, erstmals vorgelegte Gesamtausgabe der überlieferten Schriften – vermutlich, da beide deren göttlichen Ursprung nicht zur Grundlage ihrer Arbeit gemacht hatten.

Wichtiger war ihnen die Überlieferungsgeschichte. Denn anders als ihre theologischen Werke sind Hildgards heilkundliche Texte wie auch die naturkundliche »Physica« nicht in Originalen, sondern nur in lange nach ihrem Tod entstandenen Kopien, Auszügen und Zitaten erhalten. Die verschiedenen Fassungen unterscheiden sich, zudem ist die Übersetzung keineswegs trivial, da Hildegard zwar lateinisch schrieb, für Pflanzen und Erkrankungen aber sehr oft mittelhochdeutsche Bezeichnungen verwendete.

Hertzka, durch ein mystisches Erweckungserlebnis motiviert, unterließ die kritische Analyse und übersetzte bedenkenlos die ihm zur Verfügung stehenden lateinischen Texte. Dabei nahm er sich verblüffende Freiheiten. War von

AUF EINEN BLICK
DER MÖNCH ALS ARZT

1 Mit der Teilung des Römischen Reichs drohte im Westen das Wissen griechischer Ärzte verloren zu gehen. Übersetzungen ins Lateinische haben im 5. und 6. Jahrhundert zumindest einiges davon bewahrt.

2 Dieses Wissen wurde jahrhundertelang ausschließlich in Klöstern tradiert und zum Wohl von Patienten eingesetzt. Erst ab dem 11. Jahrhundert entwickelte sich eine medizinische Ausbildung an Hochschulen.

3 Einen Schwerpunkt der Klostermedizin bildete die Heilpflanzenlehre. Autoren entsprechender Schriften stützten sich auf antikes Wissen oder – wie beispielsweise Hildegard von Bingen – auf eigene Erkenntnisse.



AKG IMAGES / FINE ART IMAGES / HERITAGE IMAGES

In den Visionen Hildegards erschien die Welt als Kunstwerk Gottes. Das »Liber Divinorum Operum« illustrierte die komplexen Zusammenhänge zwischen den Sphären.

»pediculi«, also Läusen die Rede, meinte die Äbtissin seines Erachtens nach meist »virusartige Kleinstlebewesen, welche beim Aktivwerden das Krebs-Agens ausmachen«. Inzwischen liegen wissenschaftliche Rekonstruktionen der natur- und heilkundlichen Schriften sowie deutsche Übersetzungen zur weiteren Analyse vor. Nach wie vor sind viele Fragen offen. Doch schon jetzt erweisen sich etliche Vorstellungen der Hildegard-Szene als Missverständnisse, wenn nicht sogar als regelrechte Erfindungen, die von einem Autor zum nächsten tradiert wurden.

So sprach die Nonne den in der Hildegard-Medizin so gelobten Dinkel nur in der »Physica« kurz an: »Dinkel ist das beste Getreide, und er ist warm, fetthaltig, reichhaltig und wohlschmeckender als anderes Getreide.« Das einzige authentische Rezept dazu lautet: »Wenn jemand so schwach ist, dass er vor Schwäche nicht essen kann, dann nimm ganze Dinkelkörner, koch sie in Wasser und füge Schmalz oder Eidotter hinzu, so dass sie wegen des besseren Geschmacks gern gegessen werden können; gib das dem Kranken auf diese Weise zu essen, und es heilt ihn innerlich wie eine gute und gesunde Salbe.«

Fasten »nach Hildegard-Art« ist eine Erfindung

Wie dieses dienten auch andere Rezepte aus ihren Werken stets der Gesundung. Weder verfasste die Nonne Kochrezepte noch empfahl sie bestimmte Tees, Suppen oder Dinkelgerichte. Anleitungen zum richtigen Fasten widersprechen sogar ihrer Mahnung, beim Essen nicht »übermä-

ßig enthaltsam zu sein«. Tatsächlich bedeutete Fasten in jener Zeit, sich nur einmal am Tag satt zu essen, und zwar laut einer in den meisten Klöstern gültigen Regel am späten Nachmittag vor Sonnenuntergang.

Im Blick heutiger Forscher erweist sich die Bingener Äbtissin fraglos als faszinierende Persönlichkeit, dabei aber als ein Kind ihrer Zeit und allenfalls als Endpunkt einer Entwicklung, die sieben Jahrhunderte zuvor ihren Anfang genommen hatte. 493 übernahm der Ostgotenkönig Theoderich die Überreste des Weströmischen Reichs. Ganz in der antiken Herrschertradition lud er Gelehrte wie Boethius (480/85–524/26) und Cassiodor (um 485–um 580) an seinen Hof in Ravenna ein. Beide machten dem frühmittelalterlichen Europa Wissen der Antike zugänglich: Boethius übersetzte Werke griechischer »Forscher« ins Lateinische, Cassiodor verfasste auf der Grundlage antiker Wissenschaften eigene Schriften. Er gründete zudem um 554 das Kloster Vivarium als Stätte der Gelehrsamkeit. Dessen Mönche mussten nicht nur die Werke der Kirchenväter studieren, sondern auch solche von Philosophen, außerdem Abhandlungen über Gartenbau und Medizin.

Vor allem Benedikt von Nursia (um 480–547) aber ist es zu verdanken, dass antike Bücher Eingang in die Klosterbibliotheken fanden. Um 529 gründete er mit einigen Anhängern eine Abtei auf dem Monte Cassino, etwa 140 Kilometer südlich von Rom, und verfasste dafür die nach ihm benannten Benediktinerregeln (»Regula Benedicti«). Eine von ihnen lautete: »Die Sorge für die Kranken muss vor und über allem stehen. Man soll ihnen so dienen, als wären sie wirklich Christus.« Zudem legte er fest: »Die kranken Brüder sollen einen eigenen Raum haben und einen Pfleger, der Gott fürchtet und ihnen sorgfältig und eifrig dient.« Um diesem Auftrag nachzukommen, bedurfte es heilkundlicher Schriften.

Zu den Epigonen Cassiodors und Benedikts zählt der Bischof Isidor von Sevilla (um 560–636), einer der meistgelesenen Autoren des Mittelalters. Für seine 20 Bücher umfassende Enzyklopädie »Etymologiae« trug er das noch verfügbare Schrifttum der Antike zusammen. Das waren in medizinischen Dingen Texte lateinischer Autoren des 1. Jahrhunderts n. Chr. wie Aulus Cornelius Celsus und Plinius der Ältere ebenso wie Schriften der spätantiken Ärzte Caelius Aurelianus und Theodorus Priscianus. Zudem zitierte Isidor – vermittelt durch frühere Autoren – aus dem »Corpus Hippocraticum«. Dabei handelt es sich um eine maßgeblich in Alexandria kompilierte Sammlung von mehreren Dutzend medizinischen Texten, die vermutlich zwischen dem 6. Jahrhundert v. Chr. und dem 2. Jahrhundert n. Chr. geschrieben wurden. Trotz des Namens stammten wohl die wenigsten von dem berühmten griechischen Arzt Hippokrates selbst. Einige beschrieben Krankheitsver-

Der für das Kloster St. Gallen entwickelte Grundriss setzte Standards. Zu den funktionalen Einheiten gehörte auch ein Garten für Gemüse und Kräuter (Pfeil).



AKG IMAGES; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



MIT FRDL. GEN. VON YVETTE E. SALOMON

Weil er für ein Krebsmittel der von ihm erfundenen Hildegard-Medizin »Rohstoffe vom Geier« brauchte, erwirkte Gottfried Hertzka eine Abschusserlaubnis.

läufe, warnten vor kritischen Tagen und gaben Hinweise für die Therapie. Andere befassten sich mit der Entstehung von Krankheiten und erklärten beispielsweise die Epilepsie mit einem Ungleichgewicht von Körperflüssigkeiten (siehe »Auf den Schultern von Hippokrates und Galen«, **Spektrum** Juni 2019, S. 78).

Bei Isidor wird überdies deutlich, dass die Heilkunst im Frühmittelalter unter Geistlichen umstritten war. Manche kritisierten, Krankheit sei eine Strafe oder Prüfung Gottes und der Mensch dürfe daher nicht eingreifen. Isidor hielt solchen Argumenten die Bibel entgegen: »Die Heilkraft der Medizin darf nicht gering geschätzt werden. Wir erinnern uns nämlich, dass Jesaia dem erkrankten Hiskia ein Heilmittel empfohlen hat, und der Apostel Paulus sagte zu Timotheus, dass eine kleine Menge Wein nützlich sei.« 200 Jahre später waren solche Ansichten ohnehin Geschichte. Die Organisation der Heilkunst wurde Chefsache: Karl der Große (747/748–814), König der Franken und erster westliche Kaiser des Mittelalters seit dem Ende des Weströmischen Reichs, verpflichtete die Krongüter und Klöster zum Anbau von Heilpflanzen, Mönchen erlegte er zudem die medizinische Versorgung der Bevölkerung auf. Für viele Medizinhistoriker markiert dies den eigentlichen Beginn der Epoche der Klostermedizin.

Eine Vorreiterrolle kam wohl den Mönchen der Bodenseeinsel Reichenau zu. Sie entwickelten zwischen 819 und 826 einen Grundriss für das Kloster St. Gallen, das einen umfangreichen Neubau plante. Der St. Galler Klosterplan (siehe S. 75) sollte in Europa zum Standard werden. Neben funktionalen Komponenten wie Kirche, Kreuzgang, Schreibstube, Speise- und Schlafsäle, Küche, Badehaus, Latrine und Spital umfasste er auch einen Kräutergarten. Entsprechend der von Karl dem Großen erlassenen Verordnung waren darin 16 Heilpflanzen vorgesehen, darunter Salbei, Kerbel, Minze, Fenchel, Schlafmohn und die seit der Antike gegen unterschiedlichste Leiden wie Atemnot und Magenbeschwerden eingesetzte Eberraute. In seinem etwa 20 Jahre später verfassten Lehrgedicht über den Gartenbau, »Liber de cultura hortorum«, kurz »Hortulus«, listete der Reichenauer Abt Walahfrid Strabo schon 24 Heilpflanzen auf, zehn aus dem Kräutergarten und vier, die laut Klosterplan im Gemüsegarten kultiviert werden sollten, sowie zehn, die neu hinzukamen. Zu letzteren gehörte auch der heutzutage wenig bekannte Andorn *(Marrubium vulgare)* – ein guter Schleimlöser bei Husten – und der in der Medizin außer Gebrauch gekommene Heil-Ziest *(Betonica officinalis)*, der wie die Eberraute als Allheilmittel galt.

Zur Klostermedizin gehörten durchaus Aderlässe und Bäder, im St. Galler Klosterplan gibt es dazu ein eigenes Gebäude. Über chirurgische Eingriffe ist kaum etwas überliefert. Den Kern dieser Heilkunde bildete offenbar der Einsatz von Heilpflanzen, der deshalb auch im Fokus der Medizinhistoriker steht. Ein wahres Denkmal der »karolingischen Renaissance« – der von Karl dem Großen geförderten neuen Gelehrsamkeit – ist ebenso das nach seinem mutmaßlichen Entstehungsort benannte »Lorscher Arzneibuch« (siehe »Schatzkammer der Klostermedizin«, rechts). Es wurde in den 1980er Jahren am Würzburger Institut für Medizingeschichte von Ulrich Stoll ediert, übersetzt und kommentiert. Das Herzstück bilden mehr als 50 Pergamentblätter mit knapp 500 Rezepturen, die zum großen Teil aus antiken Quellen übernommen wurden. Ohne solche Vorläufer scheint hingegen eine Wundsalbe aus Schafdung, Honig und Käse zu sein, aufzutragen bei »Unterschenkelgeschwüren an den Schienbeinen«, und zwar »selbst wenn schon die Knochen herausschauen«. Tatsächlich könnte diese Salbe antibakteriell gewirkt haben. Der Hinweis »es heilt innert 20 Tagen« entspricht ungefähr der Behandlungsdauer der ersten modernen Antibiotika.

Mittelalterliche Salbe gegen moderne Keime

Das »Lorscher Arzneibuch« ist nicht das einzige erhaltene Werk, das solche überraschenden Rezepturen bietet. Ein weiteres verdankt sich wohl dem englischen König Alfred dem Großen (848/49–899), der ebenfalls die Gelehrsamkeit förderte. In der ersten Hälfte des 10. Jahrhunderts entstand dann das »Bald's Leechbook«. Darin findet sich ein Rezept für eine Augensalbe auf Basis von Lauch oder Zwiebeln – beide könnten mit dem aufgeführten altenglischen »cropleac« gemeint sein – und Knoblauch, vermischt mit Wein und Ochsengalle. Das Gemenge sollte neun Tage in einem Messinggefäß reifen, bevor man es mit einem Tuch auswrang. 2015 haben Forscher der University of Nottingham die Salbe hergestellt und an Zellkulturen von *Staphylococcus aureus* antibakterielle Wirkungen nachgewiesen. In Tierexperimenten an der Texas Tech University in Lubbock wirkte die Salbe auch bei Varianten des Bakteriums, die insbesondere gegen das Antibiotikum Methicillin Resistenz

Schatzkammer der Klostermedizin

Das »Lorscher Arzneibuch« ist das älteste erhaltene Werk der mittelalterlichen Klostermedizin.

Nicht weniger als 75 beidseitig beschriebene Blätter aus Pergament – es war eine Sensation, als der Pionier der Medizingeschichte Karl Sudhoff 1913 ein bis dahin kaum bekanntes Buch in die heutige Schrift übertrug und veröffentlichte. Es erwies sich als die älteste erhaltene medizinische Publikation aus dem heutigen Deutschland. Sie diente Mönchen als Lehrkompendium zur medizinischen Schulung und als Nachschlagewerk mit praktischen Ratschlägen.

Der Würzburger Medizinhistoriker Ulrich Stoll legte 1989 eine kommentierte Gesamtausgabe mit deutscher Übersetzung im Rahmen seiner Promotion vor. Gemeinsam mit seinem Doktorvater Gundolf Keil taufte er das Dokument »Lorscher Arzneibuch«. Es bietet faszinierende Einblicke in die Klostermedizin zur Zeit Karls des Großen (747/48–814). Der namentlich nicht genannte Autor des Arzneibuchs hatte dafür reichlich und mit spürbarer Begeisterung aus den Quellen vorchristlicher Medizin geschöpft. Doch dabei musste er sich einer grundlegenden theologischen Frage stellen: Wie vertragen sich eigentlich die ärztlichen Praktiken mit dem Christentum?

Gemäß der Bibel besitzen Krankheiten prinzipiell zwei Funktionen: Gott kann mit ihnen die Glaubensstärke eines Christen prüfen, aber auch Sünder bestrafen. Demgemäß müsste ein Patient seine Krankheit akzeptieren und so Gottes Willen respektieren. Dann aber wäre jede therapeutische Maßnahme ein Eingriff in den göttlichen Plan. Das Vorwort des Arzneibuchs rechtfertigte die ärztliche Tätigkeit jedoch mit dem christlichen Gebot der Nächstenliebe.

Herzstück des Arzneibuchs waren 482 Rezepte für Tränke, Salben und Öle. Auch die Lagerung von Heilmitteln wurde thematisiert. Einige Verfahren waren besonders innovativ. Der Therapie eines Unterschenkelgeschwürs beispielsweise diente ein frühes Antibiotikum: Schimmeliger Käse wurde so lange auf Schafdung gelegt, bis Pinselschimmel *(Penicillium)* gedieh. Den vermengte man mit Honig und trug ihn auf die Wunde auf. Bei »offenen Füßen« – gemeint waren wohl Ödeme – sollte ein Gemisch aus der im Mittelmeerraum verbreiteten Meerzwiebel sowie Minze, Honig und Essig helfen, gegen leichte psychische Befindlichkeitsstörungen Johanniskraut.

Die heute in der Staatsbibliothek Bamberg lagernde Handschrift enthält eine Seite, die vermutlich nachträglich eingefügt wurde. Der Text stammte von Bischof Leo von Vercelli († 1026), dem engsten Vertrauten Kaiser Ottos III. Die dort enthaltenen Angaben helfen, die Überlieferungsgeschichte des Arzneibuchs zu verstehen. Demnach besaß zeitweise Kaiser Otto das Werk, dann sein Nachfolger Heinrich II., der es der Dombibliothek Bamberg schenkte. 1803 gelangte es dort in die Kurfürstliche Bibliothek.

Da Otto in Italien residierte, plädierte Karl Sudhoff 1913 für einen italienischen Ursprung des Arzneibuchs. 1974 nahm sich Bernhard Bischoff, Emeritus für Lateinische Philologie des Mittelalters in München, des Problems an. Er wies anhand eines Schriftvergleichs nach, dass das Werk im Kloster Lorsch entstand, einer 764 gegründeten Benediktinerabtei im heutigen Südhessen. Laut Gundolf Keil könnte es sich bei dem Autor um Richbod gehandelt haben. Jener war zwischen 784 und 804 Abt in Lorsch und pflegte gute Kontakte zu Gelehrten am Hof Karls des Großen. Strittig ist bis heute die genaue Entstehungszeit, da die Handschrift kein Datum trägt. Während Keil von »um 788« ausging, sprach sich Bischoff für Anfang des 9. Jahrhunderts aus.

482 Rezepturen enthält die als »Lorscher Arzneibuch« weltberühmte Handschrift, die seit 2013 als Weltkulturerbe gilt.

Von Daniel Carlo Pangerl

QUELLEN

Bischoff, B.: Die Abtei Lorsch im Spiegel ihrer Handschriften. Laurissa, 1989

Fischer, K.-D.: Das Lorscher Arzneibuch im Widerstreit der Meinungen. Medizinhistorisches Journal 45, 2010

Stoll, U.: Das »Lorscher Arzneibuch«. Ein medizinisches Kompendium des 8. Jahrhunderts (Codex Bambergensis medicinalis 1). Text, Übersetzung und Fachglossar. Steiner, 1992

entwickelt hatten. Selbst Hautgeschwüre, verursacht von den als Leishmanien bezeichneten Parasiten, vermag das Heilmittel zu bekämpfen, wie Alvaro Acosta-Serrano und Lee Haines von der Liverpool School of Tropical Medicine zeigten. Leishmanien, die auch innere Organe mit dann tödlichen Folgen befallen können, werden unter anderem von Sandflöhen übertragen. Die leben zwar ursprünglich in den Tropen, kommen jedoch im Zuge des Klimawandels inzwischen beispielsweise sogar in Deutschland vor.

Wie beim »Lorscher Arzneibuch« lassen sich im »Bald's Leechbook« ebenfalls antike römische und griechische Quellen aufspüren. Das Werk dokumentiert zudem eine magische Volksmedizin: Es enthält christianisierte Zauberformeln, die auf heidnischen Vorläufern beruhen.

Das meistgelesene Kräuterbuch dieser Epoche war das Lehrgedicht »Macer floridus«, das in fast 1000 Handschriften überliefert wurde. Es zu übersetzen, gehörte zu den ersten Aufgaben der 1999 an der Universität Würzburg gegründeten Forschergruppe Klostermedizin, durchgeführt von Johannes Mayer und dem Altphilologen Konrad Goehl. Lange galt der antike römische Dichter Aemilius Macer als Urheber, daher die Bezeichnung des Werks. Verfasst hatte es jedoch im 11. Jahrhundert der Mönch Odo Magdunensis aus Meung an der Loire, wie in einigen Handschriften vermerkt ist. Er bezog sich unter anderem auf den »Hortulus«, den er aber auch kritisierte, weil dieser Liebstöckel als schädlich für die Augen bewertete. Vor allem griff Odo auf antike Schriften zurück, insbesondere von Dioskurides, Galen und Plinius dem Älteren, den er wegen der Verwendung von Eisenkraut allerdings der Zauberei bezichtigte.

Ab dem 11. Jahrhundert profitierte die Klostermedizin auch von ersten Übersetzungen arabischsprachiger Medizinbücher. Beispielsweise erweiterte Odo von Meung sein Werk in einer zweiten Fassung von 60 auf 77 Pflanzen, wobei die neu hinzugekommenen Kapitel fast ausschließlich die Heilwirkungen von Gewürzpflanzen aus Asien beschrieben. Dafür nutzte er den »Liber graduum« des Constantinus Africanus, eines aus Nordafrika stammenden Gelehrten, der in der als Schule von Salerno bekannten ersten medizinischen Bildungseinrichtung lehrte und dort arabische Texte ins Lateinische übertrug.

Ysop – gut für den Magen, hilfreich bei Totgeburten

Schriften dieser Bildungseinrichtung waren in ganz Westeuropa verbreitet und machten weiteres griechisches, aber auch arabisches Medizinwissen verfügbar. Das lässt sich beispielsweise im »Innsbrucker (Prüller) Kräuterbuch« nachweisen. Wahrscheinlich stellte im frühen 12. Jahrhundert ein bayerischer Klerikerarzt es als erstes von vornherein deutschsprachiges Werk zum Thema zusammen. Beispielsweise verriet er über den Ysop, eine im Mittelmeerraum in der Heilkunde gern genutzte Pflanze: »Wenn die Geburt im Weibe stirbt, trinke Ysop mit warmem Wasser, so löst sich das tote Kind von ihr. Es hilft auch denjenigen, welchen der Magen schwärt.«

Auch Hildegard von Bingen dürfte Lehren aus Salerno gekannt haben. Zu ähnlich sind einige Stellen ihrer »Physica« zu thematisch entsprechenden Texten, wie Irmgard Müller und die französische Hildegard-Forscherin Laurence Moulinier von der Université de Lyon 2 sowie unsere Würzburger Gruppe nachgewiesen haben. Ob ihre natur- und heilkundlichen Schriften von Visionen inspiriert waren, ist unter Forschern umstritten, da entsprechende Hinweise der Äbtissin weitgehend fehlen. Vermutlich betrachtete sie die heilsamen Wirkungen zahlreicher Pflanzen im Kontext der göttlichen Schöpfung als Geschenk an den Menschen. Gleichzeitig aber bewegte sich die Nonne im Rahmen der damaligen Medizintheorie. Das zeigt sich unter anderem daran, wie einfach es Autoren des Mittelalters fiel, Passagen ihres Werks zu übernehmen. So zitierte der »Gart der Gesundheit« (1485) einzelne Textstellen nicht nur aus dem »Macer«, sondern auch aus der »Physica«. Im »Kochbuch Meister Eberharts«, das in einer Handschrift aus dem 15. Jahrhundert erhalten ist, wird man ebenfalls fündig. Der Küchenchef des Herzogs Heinrich von Landshut entnahm der »Physica« Ratschläge zu 33 Lebensmitteln: ob diese für Kranke geeignet seien, ob man sie roh, gekocht oder gebraten verzehren solle und gegebenenfalls nur bestimmte Teile davon.

Indem Forscher die Leistungen Hildegards von Bingen in das richtige Licht rücken, machen sie auch Geistesgrößen wie Odo von Meung wieder sichtbar. Dessen »Macer« überlebte den Niedergang der Klostermedizin, den die Gründung von Universitäten im 11. Jahrhundert mit sich brachte. Es gab kaum eine bedeutende Bibliothek, die keine Kopie davon führte. Der »Macer« wurde aus dem Lateinischen in viele Sprachen übersetzt, 1477 in Neapel erstmals gedruckt. Der an einer Hochschule ausgebildete Mediziner Johann Wonnecke von Kaub übernahm bald darauf Textpassagen für seinen »Gart der Gesundheit«, der dem 1557 erstmals, 1783 letztmals aufgelegten »Kräuterbuch« des Frankfurter Stadtarztes Adam Lonitzer zu Grunde lag. Auf diesen verschlungenen Wegen gelangten Passagen des »Macer« im 18. Jahrhundert in das »Grosse vollständige Universal-Lexicon aller Wissenschaften und Künste« des Verlegers Johann Heinrich Zedler. Sogar in Nachschlagewerken des 20. Jahrhunderts lassen sich seine Spuren finden – ein überraschend langer Nachklang für ein Jahrtausend der Stagnation. ◂

QUELLEN

Brück, A. (Hg.): Hildegard von Bingen 1179–1979. Festschrift zum 800. Todestag der Heiligen. Gesellschaft für mittelrheinische Kirchengeschichte, 1979

Mayer, J.G., Goehl, K.: Höhepunkte der Klostermedizin: Der »Macer floridus« und das Herbarium des Vitus Auslasser. Reprint-Verlag, 2001

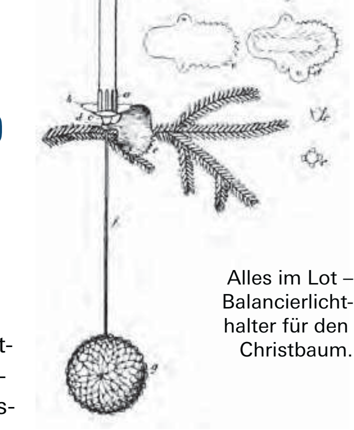
Mayer, J. G., Niedenthal, T.: Hildegard – ein Mythos? Deutsche Heilpraktiker-Zeitschrift 13, 2018

Mayer, J. G.: Klostermedizin als Teil der TEM. In: Steinmetz et al.: TEM – Traditionelle Europäische Medizin. 28. Band der Schriftenreihe der GAMED – Wiener Internationale Akademie für Ganzheitsmedizin (noch nicht erschienen)

Niedenthal, T. et al.: Eine 1000 Jahre alte Rezeptur gegen multiresistente Keime. Zeitschrift für Phytotherapie 37, 2016

1919

WEIHNACHTEN KOMMT IMMER SO PLÖTZLICH



Alles im Lot – Balancierlichthalter für den Christbaum.

»Die Christbaumschmuckindustrie sucht ständig neues zu schaffen. Zeitig genug werden Modelle ausgedacht, damit sie rechtzeitig in Fabrikation genommen und auf die Herbstmesse in Leipzig gebracht werden können. Es erfordert oft geraume Zeit, bis solche Neuerungen ihren Zweck am Weihnachtsbaum erfüllen können. Ein von W. Marquard konstruierter Lichthalter beruht auf dem Prinzip der Balancierhalter (Bild), wo ein dekorativ wirkendes Gegengewicht g, das durch einen Draht f mit dem Lichthalter verbunden ist, stets die senkrechte Lage des Lichtes bewirkt.« *Die Umschau 27, S. 431*

ABWANDERUNG VON FACHKRÄFTEN

»Die Stellenlosigkeit technischer Kräfte, die mit dem Aufhören der Kriegsaufträge und der Entlassung des Heeres begann, hat bei vielen Technikern den Gedanken, durch Auswanderung der wirtschaftlichen Not zu entgehen, wachgerufen. Um den technischen Kräften beratend zur Seite zu stehen, wurde ein Zweckverband gegründet. Aufgabe wird es sein, auch durch entsprechende Maßnahmen dafür Sorge zu tragen, daß der geistigen Verarmung unseres Volkes entgegengearbeitet wird.« *Technische Monatshefte 7, S. 223*

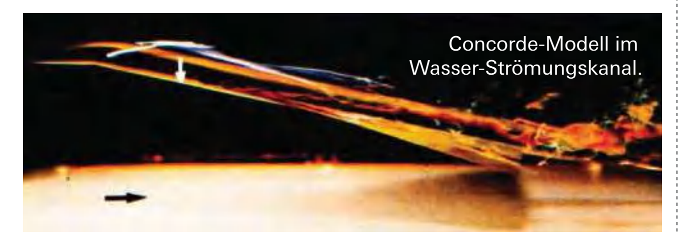
GESCHICHTEN AUS DER GRUFT

»Wachsen bei Toten vor und nach dem Eintritt der Leichenstarre Haare und Nägel weiter? Immer wieder tauchen angeblich beglaubigte Fälle auf, besonders in Amerika, wo alles möglich ist, wie jener Fall, der einen Mann betraf, dem vier Jahre nach seinem Tode der Bart durch die Fugen des Sarges hindurchgewachsen war! Haare und Nägel wachsen nicht weiter, weil die Bedingungen zum Wachstum fehlen. Mir persönlich, der ich Tausende von Leichen sah, ist oft aufgefallen, wie stark sich Haare und Nägel bemerkbar machen. Es liegt das wohl daran, daß die Haut eingesunken und zusammengefallen ist.« *Kosmos 7, S. 175*

1969

VIEL(E) WIRBEL UM DIE CONCORDE

»Die Überschallgeschwindigkeit wirft besondere aerodynamische Probleme auf, so daß zahlreiche Windkanalversuche notwendig waren, Zur Ergänzung wurden auch Versuche in einem hydrodynamischen Kanal durchgeführt. In den meisten Fällen konnten die Versuche im Wasser den Mechanismus komplexer Strömungen genau bestimmen. Die Untersuchung der Wirbelerscheinungen, die für die Strömung um die Concorde im Landeanflug kennzeichnend sind, stellt ein typisches Beispiel dar. Die Struktur der Wirbel [konnte] dadurch sichtbar gemacht werden, daß man an verschiedenen Stellen der Modelle Farbe austreten ließ (Bild).« *Die Umschau 15, S. 484–485*



Concorde-Modell im Wasser-Strömungskanal.

LOCKENDE MAGNETE

»Die neuen amerikanischen Lockenentwickler mit Magnet und Batterie bieten die Möglichkeit, zu einer schönen und haltbaren Frisur zu kommen. Vor dem Eindrehen werden die Haare mit feinen Metallspänen, die mit Haarkosmetikpuder gemischt sind, eingestäubt. Unter dem Einfluss der in der Lockenwicklerrolle befindlichen Batterie bildet der ›Kosmetik-Magnetstaub‹ eine Schicht um das gewickelte Haar, welche die Frisur für mehrere Tage haltbar macht.« *Neuheiten und Erfindungen 391, S. 132*

EIN HAUCH VON POMPEJI

»Gegenstände aus Holz aus der Mayazeit sind bisher sehr selten geborgen worden; sie sind auch bei dem dort herrschenden Klima nicht zu erwarten. 1966/67 stieß ich bei Grabungen unter der Tempel-Pyramide [in Tikal] im Grab 195 auf besondere Umstände: In dieses um 600 n. Chr. errichtete Grabgewölbe war Schlamm eingedrungen und hatte die darin befindlichen Gegenstände bedeckt. Während das Holz im Laufe der Jahrhunderte verging, hatte sich der Schlamm derartig verhärtet, daß die ursprünglichen Formen als Hohlräume erhalten blieben. Es gelang mir, diese mit Gips auszufüllen und so positive Formen der ehemaligen Objekte zu erhalten.« *Die Umschau 16, S. 507*

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN
NICHTPERIODISCHE PARKETTKUNST

Was Physikern als Modellstruktur für Quasikristalle dient, machen sich Künstler zu Nutze, um aus der Mischung von Regelhaftigkeit und Undurchschaubarkeit besondere Effekte zu erzielen.

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und war bis 2018 Redakteur bei **Spektrum** der Wissenschaft.

spektrum.de/artikel/1647852

Einige Mathematiker haben sich doch tatsächlich in die fünfte Dimension begeben, um von diesem – sagen wir herausgehobenen – Standpunkt aus etwas ganz gewöhnlich Zweidimensionales zu studieren: die nichtperiodischen Pflasterungen der Ebene mit dieser seltsamen fünfzähligen Symmetrie, die unter dem Namen »Penrose-Pflasterungen« berühmt geworden sind. Der Umweg erweist sich als sehr elegant und öffnet das Tor zu einer umfassenden Theorie der nichtperiodischen Ordnung (siehe **Spektrum** Februar 2002, S. 64); zu allem Überfluss kann man auf diesem Weg Tapetenfunktionen konstruieren, die einer echten Pflasterung schon sehr nahekommen (siehe **Spektrum** Mai 2019, S. 74). Aber geht es vielleicht auch etwas bodenständiger?

Es geht. Zwei mathematische Hilfsmittel, die ohne expliziten Rückgriff auf höhere Dimensionen auskommen, liefern eine Fülle von Ergebnissen. Das eine ist unter dem Stichwort »Anlegeregeln« bekannt, das andere unter den Namen »Inflation«, »Deflation« und »Substitution«; jedes für sich beschreibt einen Teilaspekt des Werkzeugs.

Nichtperiodische Pflasterungen sind einerseits irgendwie anarchisch in dem Sinn, dass man sich nie darauf verlassen kann, was als Nächstes kommt. Andererseits sind sie überaus regelmäßig, indem dieselben Elemente und auch dieselben Zusammensetzungen aus Elementen immer wieder vorkommen. Dieses Spannungsfeld zwischen Ordnung und Chaos eröffnet auch Künstlern reizvolle Möglichkeiten; von einigen soll im Folgenden die Rede sein.

Penrose-Pflasterungen gibt es in zwei Varianten. Die eine besteht aus »Pfeilen« und »Drachen« (in der Literatur als »darts« und »kites« bekannt), die andere aus dünnen und dicken Rauten. Sie sind eng miteinander verwandt; denn jeder Baustein aus den beiden Pflasterungen lässt sich seinerseits in zwei »goldene« Dreiecke zerlegen. So nennt man die beiden gleichschenkligen Dreiecke, bei denen die längere Seite zur kürzeren das Verhältnis des goldenen Schnitts hat (siehe Bild, S. 82 links).

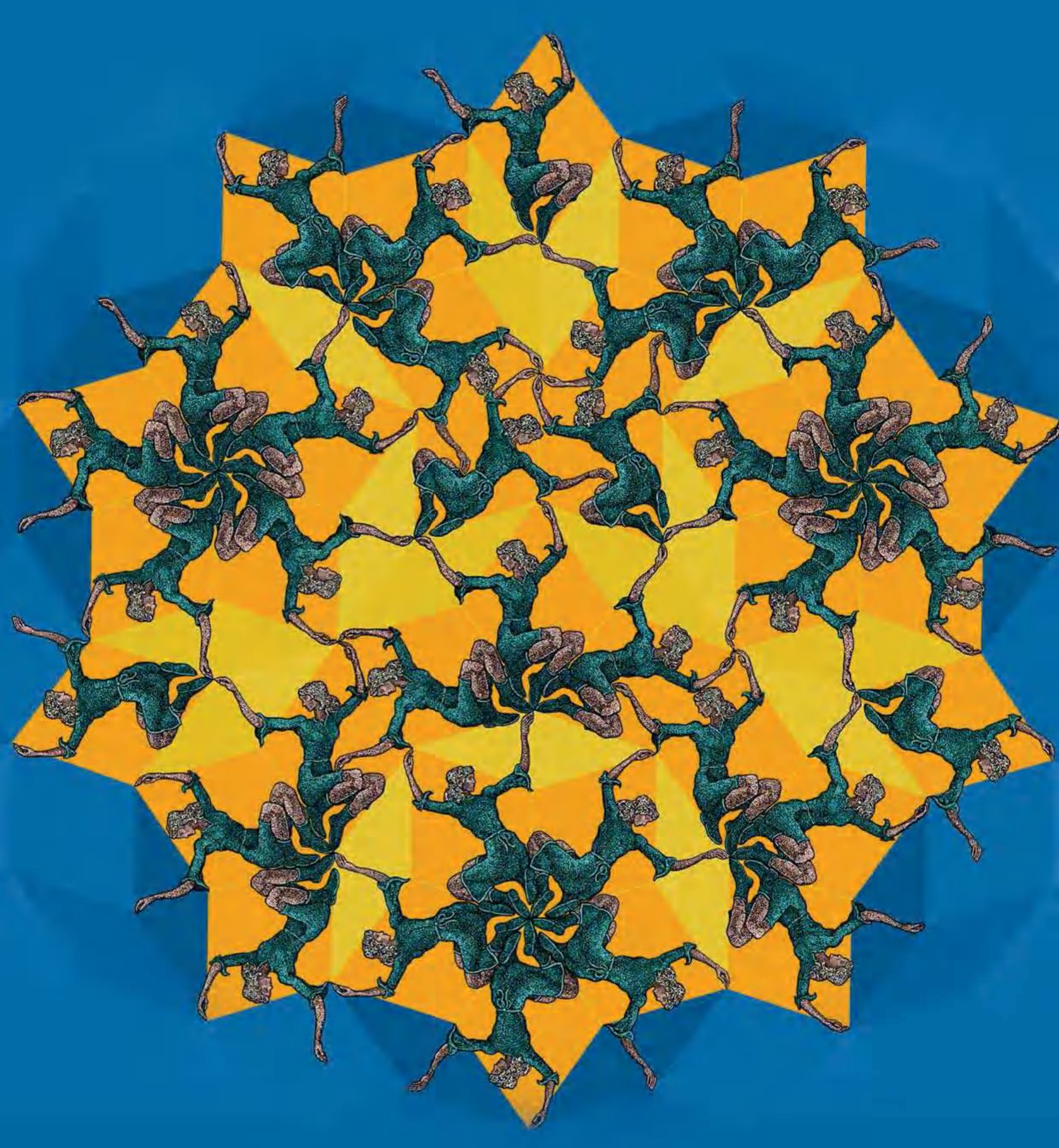
Aber so symmetrisch, wie sie aussehen, sind die Pflastersteine gar nicht. Wären sie es, so könnte man mit lauter dicken oder lauter dünnen, parallel verschobenen Rauten die Ebene füllen. Ähnliches gelingt mit Drachen oder Pfeil, indem man an ein Element ein um 180 gedrehtes Exemplar desselben anfügt und mit diesem Zweierverbundstück die Ebene pflastert. Das wären allerdings periodische Pflasterungen, also solche, die sich immer wieder parallel verschoben bis ins Unendliche wiederholen; und das sollen die Penrose-Pflasterungen gerade nicht sein.

Anlegeregeln und Ammann-Linien

Vielmehr haben die Pflastersteine besondere Eigenschaften, die derartiges periodisches Anlegen verhindern. Man pflegt sie zu verdeutlichen, indem man die Steine mit geeigneten Eindellungen und Ausbuchtungen versieht oder mit Mustern, von denen man fordert, dass sie sich über eine Steingrenze hinweg fortsetzen.

Unter allen denkbaren derartigen Musterungen ist die im rechten Bild auf S. 82 nicht unbedingt die schönste, aber zweifellos die aufschlussreichste. Es handelt sich um die Ammann-Linien, so benannt nach dem amerikanischen Postbeamten und Amateurmathematiker Robert Ammann (1946–1994), der im stillen Kämmerlein nicht nur diese Linien, sondern auch noch zahlreiche andere Ergebnisse zum Thema fand.

Auf einem einzelnen Stein wirken die Ammann-Linien eher willkürlich. Warum verlaufen sie so und nicht anders? Immerhin fällt auf, dass sie den Weg eines Lichtstrahls



Das »Wagenrad« (englisch: cartwheel), der gelb eingefärbte, zehnzählig-symmetrische Ausschnitt aus einer Penrose-Pflasterung mit dicken und dünnen Rauten, spielt innerhalb der Theorie eine herausragende Rolle, weil es die Anordnung der weiter draußen liegenden Parkettsteine in hohem Ausmaß festlegt. Der Name hat den Nürnberger Künstler Uli Gaenshirt dazu animiert, die dicken Rauten mit dem Bild einer Frau zu dekorieren, die uns in 35-facher Ausfertigung demonstriert, wie man ein Rad schlägt (englisch: doing a cartwheel).

a

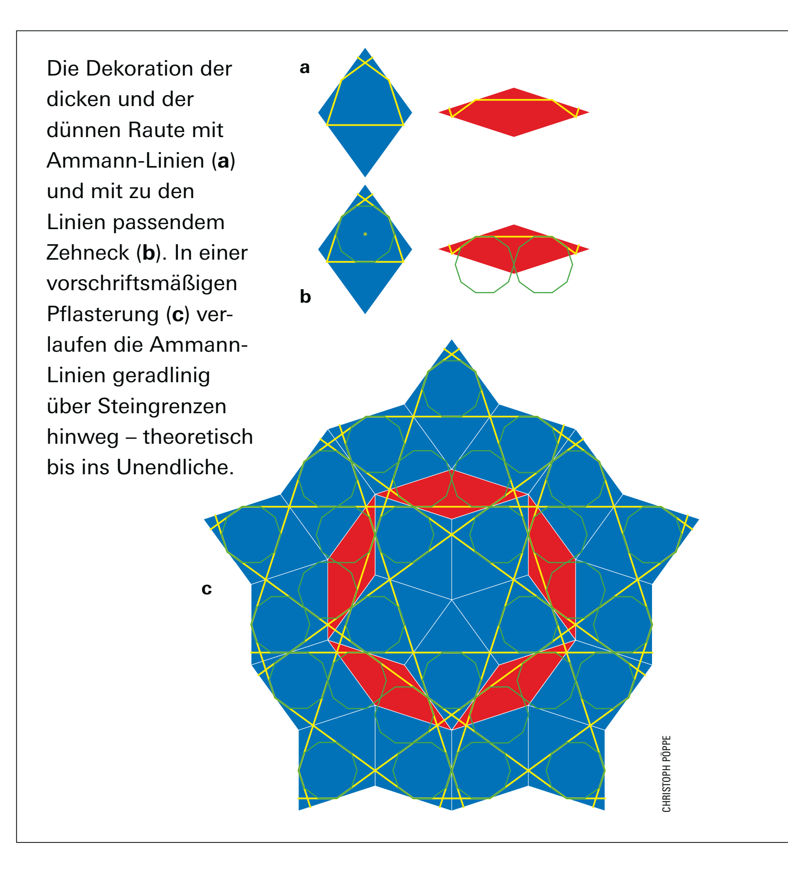
b

c

d

CHRISTOPH PÖPPE

Die elementaren Bausteine jeder Penrose-Pflasterung sind gleichschenklige Dreiecke mit dem Seitenverhältnis $\tau \approx 1{,}618$ des goldenen Schnitts (»goldene Dreiecke« oder auch »Robinson-Dreiecke«, **a**). Das hohe Dreieck hat den Scheitelwinkel 36 Grad, das breite 108 Grad. Zwei gleiche goldene Dreiecke, mit ihren Basisseiten aneinandergesetzt, ergeben die dünne und die dicke Raute der Penrose-Pflasterung in der einen Variante (**b**). Setzt man dieselben Dreiecke mit jeweils anderen Seiten zusammen, so ergeben sich Drachen und Pfeil der anderen Variante (**c**). Damit diese beiden Teile zusammenpassen, müssen die breiten Dreiecke mit dem Faktor τ verkleinert (oder die hohen entsprechend vergrößert) werden. Ein hohes Dreieck ist in ein kleines breites und ein kleines hohes zerlegbar, ein breites in ein hohes und ein kleines breites (**d**).



Die Dekoration der dicken und der dünnen Raute mit Ammann-Linien (**a**) und mit zu den Linien passendem Zehneck (**b**). In einer vorschriftsmäßigen Pflasterung (**c**) verlaufen die Ammann-Linien geradlinig über Steingrenzen hinweg – theoretisch bis ins Unendliche.

beschreiben, der rechtwinklig in den Stein eindringt, mehrfach an seinen Kanten innen reflektiert wird und am Ende wieder rechtwinklig austritt. Und in das Muster der Ammann-Linien passt ein regelmäßiges Zehneck mit seinen Winkeln: perfekt in der dicken Raute, weniger überzeugend in der dünnen. Legt man aber die Steine so zu einer Pflasterung zusammen, wie die Dekoration es vorschreibt, dann setzen sich die Ammann-Linien über alle Steine hinweg geradlinig fort – bis ins Unendliche, wenn die Pflasterung korrekt gebaut ist.

Eine der beiden genannten Möglichkeiten, eine Penrose-Pflasterung zu erzeugen, ist das Verfahren des Fliesenlegers: Man legt einen Stein irgendwohin und fügt weitere Steine an, entsprechend den Anlegeregeln (»matching rules«), die durch die Form der Steine oder ihre Musterung vorgegeben sind.

Zweidimensionale Quasikristalle

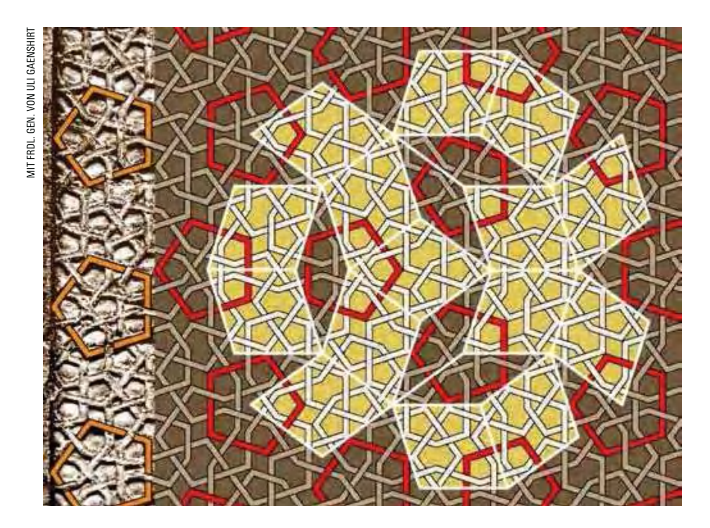
Für die Physiker ist das eine geradezu natürliche Vorgehensweise. Penrose-Pflasterungen sind nämlich eine auf zwei Dimensionen reduzierte Modellstruktur für etwas, das sie wirklich interessiert: Quasikristalle, jene seltsamen Festkörper, die im Röntgenbeugungsbild eine fünfzählige Symmetrie zu erkennen geben und aus diesem Grund keine gewöhnlichen (periodischen) Kristalle sein können. Auch Quasikristalle haben einmal klein angefangen, das heißt, ein Atom nach dem anderen hat sich an das wachsende Häuflein angelagert. Also müssen die Anlegeregeln irgendwelchen Kräften entsprechen, die auf das anlagerungswillige Atom wirken und ihm helfen, seinen richtigen Platz zu finden.

Nur haben alle Anlegeregeln eine heimtückische Eigenschaft: Der Fliesenleger kann sich nie sicher sein, dass er nicht irgendwann in eine Sackgasse gerät – eine Anordnung, an die zumindest an einer Stelle kein Stein mehr passt.

Das wirkt zunächst seltsam. Immerhin bringt jeder Stein seine Ammann-Linien mit sich; die kann man bis ins Unendliche verlängern. Immer wieder treffen sich irgendwo weit draußen mehrere Ammann-Linien von verschiedenen Steinen, und zwar so, dass an dieser Stelle nur ein Stein und der nur in einer bestimmten Orientierung liegen kann. Dieser Stein trägt gemeinhin noch weitere Linien abgesehen von jenen, die seine Position erzwingen. Dadurch füllt sich die Ebene allmählich mit Ammann-Linien, die weitere Positionen festlegen, und so fort.

Es gibt also jede Menge Ordnung; aber alle Vorschriften zusammen – es gibt noch etliche mehr – geben dem Fliesenleger keine eindeutige Anweisung an die Hand. Es gibt im Allgemeinen mehrere zulässige Möglichkeiten, eine angefangene Pflasterung fortzusetzen, und darüber hinaus noch allerlei unzulässige. In der Realität würde der Quasikristall nicht groß werden, bis er rein durch Zufall in die erste Sackgasse gerät. Wie könnte er wieder daraus herausfinden? Oder gibt es bessere Anlegeregeln, die ihn von vornherein auf den richtigen Weg zwingen? Bislang sind diese Fragen nicht endgültig geklärt.

Das zweite mathematische Mittel ist noch ferner der physikalischen Realität, aber überaus hilfreich. Die Grundidee ist: Man zerlege jeden Pflasterstein aus dem Sortiment in kleinere Teile. Diese ergeben ein neues Sortiment, welches im Idealfall aus verkleinerten Exemplaren des ur-



MIT FRDL. GEN. VON ULI GAENSHIRT

Ein steinernes Flechtmuster aus Kayseri (Anatolien) enthält neben langen geknickten Linien auch regelmäßige Fünfecke. Uli Gaenshirt hat eine Fortsetzung dieses Musters konstruiert, indem er die Rauten des Penrose-Parketts mit geeigneter Musterung versah. Bemerkenswerterweise sind in der dünnen Raute nicht nur ein Anteil vom regelmäßigen Fünfeck zu finden, sondern auch Linien, die den Ammann-Linien recht nahekommen.

sprünglichen besteht. Für die Penrose-Pflasterungen lässt sich diese Substitution am einfachsten an den Dreiecken darstellen, aus denen sich die Rauten einerseits sowie Pfeil und Drachen andererseits zusammensetzen (siehe Bild d, S. 82 links). Bemerkenswerterweise wird in einem ersten Substitutionsschritt aus einem Pfeil-und-Drachen-Parkett ein Rautenparkett, und im nächsten Schritt geschieht das Umgekehrte.

Dass es für ein Sortiment von Steinen überhaupt eine Substitution gibt, ist alles andere als selbstverständlich. Aber es kommt in erstaunlich vielen Fällen vor; Dirk Frettlöh von der Universität Bielefeld unterhält dazu eine umfangreiche Internet-Sammlung (http://tilings.math.uni-bielefeld.de/substitution). Und mit einer Substitution hat man ein mächtiges Mittel zur Erzeugung beliebig großer Pflasterungen an der Hand.

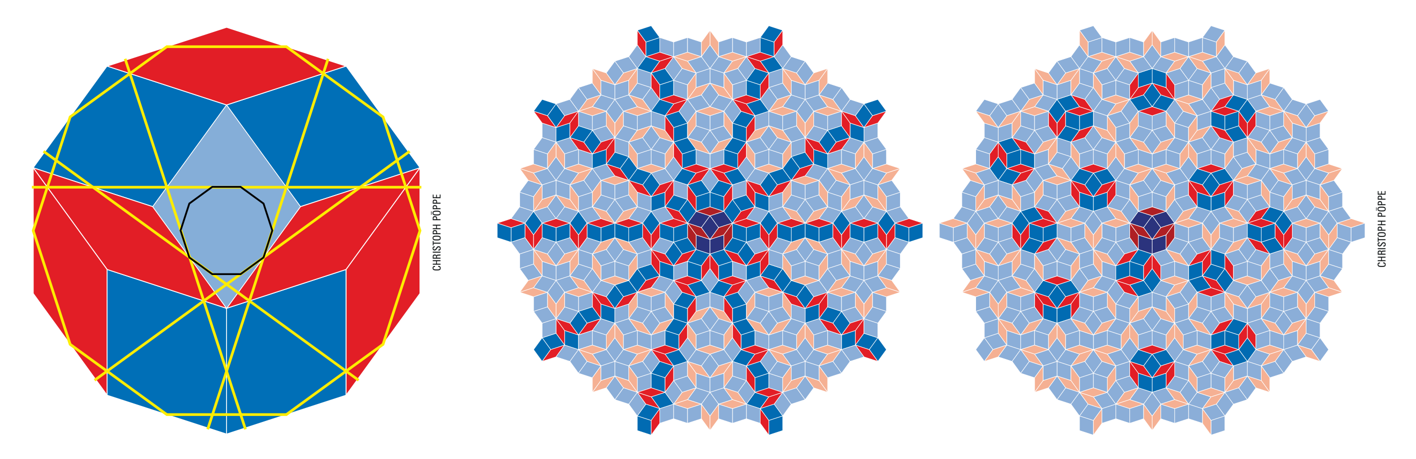
Man beginnt mit einem kleinen Stück Parkett, zum Beispiel einem einzelnen Stein, und macht daraus durch Anwendung der Substitutionsregel ein Stück aus mehreren kleinen Steinen. Dieses vergrößert man, bis die kleinen Steine auf die Größe der ursprünglichen herangewachsen sind (»Inflation« im Sinn von Aufblasen). Bei Bedarf schiebt und dreht man es so zurecht, dass das alte Parkettstück mit einem Teil des neuen zur Deckung kommt. Im Endeffekt hat man dadurch an das alte Stück ein paar neue Steine angebaut.

Diesen Prozess aus Substitution und Inflation kann man nun beliebig oft wiederholen, wodurch das Parkettstück

Aus der dünnen Raute der Penrose-Pflasterung entsteht ein langes Sechseck, aus der dicken eine Form namens »boat«, die an ein Papierschiffchen erinnert (unten). Rechts: Rund um das Zentrum **C** liegen vier gedachte Zehnecke, an deren Eckpunkten sich je ein Fünfeck befindet (helle Punkte). In starkem Kontrast zu dieser Symmetrie nehmen die »Fäden« des Flechtwerks völlig chaotisch erscheinende Wege.

MIT FRDL. GEN. VON ULI GAENSHIRT

MIT FRDL. GEN. VON ULI GAENSHIRT



Das »Wagenrad« besteht aus fünf dicken und fünf dünnen Rauten, die sich in einer speziellen, wenig symmetrischen Anordnung zu einem regelmäßigen Zehneck fügen. Das Zehneck (schwarz), das zu den Ammann-Linien in der zentralen Raute (blassblau) passt, findet sich vergrößert in den Ammann-Linien der anderen Komponenten (gelb) wieder.

Aus dem zentralen Wagenrad (dunkle Farben) erwächst durch wiederholte Substitution und Inflation ein Parkett beliebiger Größe. Wenn man die vom Zentrum nach außen verlaufenden »Würmer« (linkes Bild, volle Farben) um die eigene Achse dreht, bleiben alle Anlegeregeln erfüllt; insbesondere sind diese Positionen nicht durch das zentrale Wagenrad erzwungen. Neben dem zentralen Wagenrad entstehen unweigerlich viele weitere; das rechte Bild zeigt davon eine kleine Auswahl.

nach außen immer weiterwächst, im Inneren aber unverändert bleibt. So kann man unendlich große Parkettierungen erzeugen, ohne je in eine Sackgasse zu geraten.

Unter Umständen ist der Prozess sogar umkehrbar (»Deflation«). Man fasst dazu gewisse Gruppen von Steinen zu jeweils einem Superstein zusammen (dass es diese Gruppen gibt, folgt aus den Anlegeregeln), verkleinert das entstehende Parkett derart, dass die Supersteine wieder Normalgröße haben, und wiederholt diese Aktionen, bis am Ende nur noch ein Stein übrig bleibt. Diese Herangehensweise ist zwar alles andere als konstruktiv, aber sie erlaubt Rückschlüsse auf die Eigenschaften, die das Parkett vor dem Eindampfen haben musste.

Das Substitutionsverfahren erlaubt gewisse Variationen. So sind die goldenen Dreiecke des Penrose-Parketts zwar spiegelsymmetrisch, aber ihre Binnenstruktur, die in den Anlegeregeln zum Ausdruck kommt, ist es nicht. Es gibt also »rechte« und »linke« goldene Dreiecke (siehe Bild d, S. 82 links). Da kann sich ein Künstler die Freiheit nehmen, sie unterschiedlich zu behandeln. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, beim Spiegeln Schwarz und Weiß zu vertauschen oder allgemeiner eine Farbe durch die andere zu ersetzen. Oder wenn von zwei einander kreuzenden Linien in einem Dreieck die eine zuoberst liegt, dann ist es in dessen Spiegelbild die andere.

Der Österreicher Kurt Bruckner, der in Schaffhausen (Schweiz) lebt, ist ebenso wie Uli Gaenshirt eigentlich Bildhauer, hat sich aber in den letzten Jahren zunehmend auf künstlerische Arbeiten mit Penrose-Pflasterungen verlegt. Mit seinen speziellen Substitutionsverfahren erzielt er eindrucksvolle Effekte (siehe www.kurtbruckner.ch).

Ob die Künstler, die im Mittelalter die komplizierten islamischen Flechtwerkmuster in Stein meißelten oder aus Kacheln zusammensetzten, eine Theorie der Substitution für Penrose-Parkette hatten? Paul Steinhardt und Peter Lu von der Harvard University hatten das 2007 auf Grund einer Analyse derartiger Muster vermutet (siehe **Spektrum** September 2007, S. 14). Wie dem auch sei: Der Nürnberger Künstler Uli Gaenshirt hat die Rauten der Penrose-Pflasterung so dekoriert, dass sie einem historischen Flechtwerk sehr nahekommen (siehe Bild, S. 83 oben).

Für ein anderes, einem persischen Flechtwerk (Girih) nachempfundenes Muster hat Gaenshirt die Penrose-Rauten bis fast zur Unkenntlichkeit deformiert (siehe Bild, S. 83 unten). Zentrales Element dieses Bilds ist das so genannte Wagenrad, ein Zehneck aus fünf dünnen und fünf dicken Rauten, das in der Theorie der Penrose-Pflasterungen eine zentrale Rolle spielt (siehe Bild oben links).

Durch wiederholte Substitution mit Inflation entsteht aus dem Wagenrad eine Parkettierung, die ihrerseits unendlich viele Wagenräder enthält (siehe Bilder oben Mitte und rechts). Über seine künstlerische Arbeit hinaus hat Gaenshirt ein Mittel gefunden, diese Parkettierung nicht nur über Substitution, sondern durch Einhaltung von Anlegeregeln zu erzeugen. Allerdings muss der Fliesenleger sehr komplizierte Mittel anwenden, um sicherzugehen, dass der soeben probeweise gelegte Stein tatsächlich richtig liegt. ◂

QUELLEN

Fang, F. et al.: Methods for calculating empires in quasicrystals. Crystals 7, 2017

Gaenshirt, U., Willsch, M.: The local controlled growth of a perfect Cartwheel-type tiling called the quasiperiodic succession. Philosophical Magazine 87, 2007

Senechal, M.: The Mysterious Mr. Ammann. The Mathematical Intelligencer 26, September 2004

Steurer, W., Arlitt, S.: Kurt Bruckner's view on the Penrose tiling. Structural Chemistry, Juni 2016 10.1007/s11224-016-0790-1

LITERATURTIPP

Grünbaum, B., Shephard, G. C.: Tilings and patterns. Freeman, 1987

Kapitel 10 »Aperiodic Tilings« gibt die erste vollständige Theorie der Penrose-Pflasterungen.



Frauke Fischer,
Frank Nierula
DER PALMÖL-KOMPASS
Hintergründe, Fakten und Tipps für den Alltag
oekom, München 2019
176 S., € 20,–

DIETER MAHSBERG, AUS FISCHER, S., NIERULA, F.: DER PALMÖL-KOMPASS; MIT FRDL. GEN. DES OEKOM VERLAGS



ÖKOLOGIE
HEISS BEGEHRT UND HOCH PROBLEMATISCH

Rund 60 Millionen Tonnen Palmöl werden jährlich produziert und verarbeitet. Ein Ratgeber beleuchtet die Hintergründe.

Biodiesel, Schmierstoffe, Waschmittel, Kosmetika, Lebensmittel: Sie alle gehören zu den Produkten, die häufig Palmöl enthalten. Die Biologen Frauke Fischer und Frank Nierula widmen sich in diesem Buch dem kommerziellen Anbau der Ölpalme und den damit verbundenen ökologischen und sozialen Schwierigkeiten. Verglichen mit anderen Öl produzierenden Pflanzen wie Mais, Soja oder Raps ist die Ölpalme die bei Weitem ergiebigste. Aus Mais lassen sich pro Hektar Anbaufläche gerade einmal 145 Kilogramm, aus Raps immerhin eine Tonne Öl gewinnen – während es bei der Ölpalme bis zu fünf Tonnen sind. Südostasiatische Staaten wie Indonesien und Malaysia sind mit großem Abstand die Hauptanbaugebiete. Hinzu kommen afrikanische Länder wie Nigeria, die Elfenbeinküste, die Demokratische Republik Kongo oder Ghana sowie mittel- und südamerikanische Staaten wie Honduras, Guatemala und Ecuador.

Leider bringen der Anbau der Palmen und die Verarbeitung ihrer bis zu 25 Kilogramm schweren Fruchtstände gewaltige Probleme mit sich. Plantagenbetreiber müssen oft große Anbauflächen durch Brandrodung von Regenwald schaffen, was nicht nur die »grüne Lunge« der Erde mitsamt ihrer Artenvielfalt zerstört, sondern auch riesige Mengen CO_2 freisetzt. Zudem haben Ölpalmen einen hohen Wasserbedarf, weshalb ihr großflächiger Anbau in den Wasserhaushalt eines Gebiets massiv eingreift. Bei der Ölgewinnung selbst fallen unter anderem Rückstände wie das »palm oil mill effluent« (POME) an, das häufig nicht fachgerecht verarbeitet, sondern

Ölpalmenplantagen, hier eine mit Entwässerungsgraben in Costa Rica, haben oft eine desaströse Ökobilanz.

ungeklärt in nahe gelegene Gewässer eingeleitet wird und diesem durch chemische Zersetzungsprozesse Sauerstoff entzieht. Massensterben von Fischen und anderen Wasserbewohnern sind die Folge – auch hier leidet also die Artenvielfalt. Ferner schildert das Autorenduo die negativen sozialen Folgen des Plantagenbetriebs: etwa wenn das Profitstreben von Konzernen dazu führt, geltendes Arbeitsrecht auf den Plantagen zu missachten, keine Schutzkleidung für den Umgang mit giftigen Chemikalien bereitzustellen oder auf Kinderarbeit zurückzugreifen. Auch die Rechte Indigener geraten im Plantagenbetrieb immer wieder unter die Räder.

Als ein Gegenmittel heben die Autoren die Marktmacht aufgeklärter Konsumenten hervor. Sie betonen die Möglichkeit, durch eigenes Kaufverhalten die Nachfrage nach Palmöl und damit die einschlägigen Probleme zu reduzieren. Dazu stellen sie Ökosiegel zum Palmölstandard vor und haben dem Buch einen praktischen Einkaufshelfer beigelegt. Es ist jedoch sehr schwierig, entsprechende Produkte adäquat zu nennen, da Palmölzusätze selten als solche gekennzeichnet werden. Stattdessen verbergen sie sich oft hinter chemischen Bezeichnungen, durch die man sich erst mühsam im Kleingedruckten der Zutatenlisten arbeiten muss. Daher ist der Einkaufshelfer zwar gut gemeint, doch wegen der vielen Stoffe, die Palmöl entweder sicher enthalten oder enthalten könnten, dürfte das kritische Durchschauen von Inhaltsangaben in der täglichen Einkaufspraxis schnell an seine Grenzen stoßen.

Davon unbenommen legt das Autorenduo eine leicht lesbare und fundierte Einführung ins Thema vor. Produktion, Einsatz und Probleme des Palmöls sind gut aufgearbeitet, wozu zahlreiche Tabellen, Karten und Grafiken beitragen. Fachbegriffe werden mit eingeschobenen Legenden sowie einem angehängten Glossar erklärt. Das Buch ist konsumkritischen Lesern zu empfehlen.

Der Rezensent Martin Schneider ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.

GESUNDHEITSWESEN

LAND UNTER IN DER PFLEGE

Der Krankenpflege-Azubi Alexander Jorde zeigt Missstände in seinem Berufsfeld auf und sucht nach Lösungen.

Wenn es um die Pflege in Deutschland geht, ist oft von Notstand die Rede. Die Zahl der Menschen mit Pflegebedarf nimmt zu, doch mangelt es an Pflegekräften. Aus dem Themenreport »Pflege 2030« der Bertelsmann Stiftung geht hervor, dass in zehn Jahren bis zu 400000 Pflegekräfte fehlen könnten.

Im September 2017 ergriff der Krankenpflege-Azubi Alexander Jorde in der ARD-Sendung »Wahlarena« das Wort. Jorde brachte den Notstand offen zur Sprache und bot Angela Merkel damit Paroli. Seit diesem Auftritt ist der inzwischen 22-Jährige ein gefragter Gast in Talkshows. Er nutzt den Medienrummel, um die Probleme seines Berufsstands in der Öffentlichkeit anzusprechen.

Alexander Jorde
KRANKE PFLEGE
Gemeinsam aus dem Notstand
Tropen, Stuttgart 2019
210 S., € 17,–



Jorde steht kurz vor Abschluss seiner Ausbildung. Er hat sich bewusst für den Pflegeberuf entschieden, seine Wahl bereut er nicht. Es sei, so schreibt er, Sinn stiftend, kranke Menschen zu pflegen und bei ihrer Genesung zu unterstützen. Die Arbeitsbedingungen in der Klinik ließen die fachgerechte Pflege aber nicht zu. Stattdessen herrschten mitunter schlimme Zustände: Pflegebedürftige Menschen litten unter Mangelernährung oder lägen stundenlang in ihren Ausscheidungen. Wie konnte es so weit kommen?

Pflegende in Kliniken und Heimen stehen unter enormem Zeitdruck, wie aus dem Buch hervorgeht. Dadurch leidet die Qualität der pflegerischen Versorgung, und auch die Gefahr von Fehlern erhöht sich. Statt Aufgaben in Ruhe, gewissenhaft und gründlich erledigen zu können, müssen Pflegekräfte priorisieren: Was nicht lebensnotwendig ist, hat zu warten.

In deutschen Kliniken kommt es häufig vor, dass Pfleger von Patient zu Patient hetzen. Andere Länder zeigen, dass das nicht so sein muss. Paradebeispiel hierfür ist Norwegen. Auf eine Pflegekraft kommen dort im Durchschnitt sechs Patienten. In Deutschland sind es mehr als doppelt so viele.

Jorde appelliert an die Politik, die Missstände in der Pflege zu verringern. Der Blick ins Ausland könne dabei helfen. Ein möglicher Schritt wäre beispielsweise die Einführung einer Untergrenze in der Pflege. Das würde bedeuten, die Zahl der zu versorgenden Patienten pro Pflegekraft zu begrenzen. Seit Anfang des Jahres gibt es solche Beschränkungen zwar, allerdings nur auf bestimmten Stationen. Zudem sollten, so der Autor, jungen Menschen Anreize dafür geboten werden, diesen Berufsweg einzuschlagen. Die momentan relativ schlechte Bezahlung, Schichtdienst und starre Hierarchien in den Kliniken schreckten eher ab.

Auch von den Pflegekräften fordert Jorde ein Umdenken. Statt im stillen Kämmerchen über die Zustände zu schimpfen, sollten sie aktiv werden, etwa durch das Eintreten in eine Gewerkschaft. Der Autor verlangt auch Widerstand gegen eine unrealistische Personalplanung. Derzeit funktioniere eine knappe Bemessung der Pflegekräfte von Seiten der Kliniken, denn genügend Kolleg(inn)en seien bereit, außerplanmäßig einzuspringen. Ohne diese Bereitschaft würde das Ausmaß der Fehlplanungen viel deutlicher; im Extremfall müssten sogar Stationen geschlossen werden. Ein entschiedeneres Pochen auf das Einhalten von Dienstplänen würde Klinikleitungen dazu zwingen, schon

im Voraus mehr Pflegende pro Schicht einzuteilen.

Gerade Lesern, die den pflegerischen Alltag in Kliniken nicht kennen, gewährt das Buch einen aufschlussreichen Einblick. Der Autor hat zwar vor allem praktische und weniger theoretische Expertise, dennoch – oder genau deshalb – gelingt es ihm im Buch wie in seinen Fernsehauftritten, die Probleme der Pflege anschaulich und unprätentiös auf den Punkt zu bringen.

Die Rezensentin Hanna Stern hat Germanistik und Kognitionswissenschaft studiert, eine Krankenpflegeausbildung absolviert und arbeitet als Redakteurin in einem medizinischen Fachverlag.

LINGUISTIK
WIESO DER MAULWURF KEINE MÄULER WIRFT

In unserer Alltagssprache wimmelt es von Tieren. Wie es dazu kam, erklärt der Germanist Matthias Heine.

Der Sternhaufen, den man »suculae« (Schweinchen) nenne, verdanke seinen Namen einer Fehlübersetzung aus dem Griechischen. Dort nämlich heiße er »Hyaden«, was sich aber eben nicht von »hys« (Schwein) ableite, sondern von »hyein« (regnen). Mit solchen Informationen belieferte im 2. Jahrhundert n. Chr. ein gewisser Aulus Gellius sein Publikum, der vermutlich nur noch Latinisten bekannt ist. Gellius trug eine gewaltige Sammlung von Lesefrüchten, Anekdoten und Kuriositäten zusammen und kippte sie unter dem Titel »Attische Nächte« ungeordnet über seine Leser aus.

Ganz ähnlich verfährt nun der Germanist und Journalist Matthias Heine in seinem Büchlein »Mit Affenzahn über die Eselsbrücke«. Dem Werk ist unter anderem zu entnehmen, dass der »Kater« nach exzessivem Alkoholgenuss nichts mit der Deutschen liebstem Haustier zu tun hat, sondern auf eine Verballhornung des »Katarrh« zurückgeht, mit dem Studenten früher diese Unpässlichkeit vornehm umschrieben.

Anders als sein antiker Kollege aber beschränkt Heine sich auf »Tiere in unserer Sprache« (so der Untertitel), und er ordnet sein Wissen sehr wohl, nämlich nach dem Alphabet: vom Aal bis zur Zicke. Der Autor beschreibt für diverse Redensarten, wie sie entstanden sind und welche Geschichte sie durchliefen, und er fragt nach den zu Grunde liegenden Bildern der jeweiligen Tierspezies. Was dabei herauskommt, ist laut Heine selbst »weniger ein Buch über Tiere als ein Buch über Menschen, die Tiere nutzen, um sich selbst zu deuten«. Das Werk ähnelt fast schon einer miniaturisierten Kulturgeschichte des Verhältnisses von Mensch und Tier, wie es im Sprachgebrauch fassbar wird – leichthändig formuliert und ohne überbordende Gelehrsamkeit.

Die gesammelten Redensarten reichen von der indoeuropäischen Frühzeit bis zum Computerzeitalter. Erstaunt nimmt man zur Kenntnis, dass eine 1970 patentierte »computer-aided display control« bereits 1965 in einem Forschungsbericht als »mouse« bezeichnet wurde. Wer wissen möchte, seit wann Dinosaurier als Metapher für unbelehrbar rückständige Zeitgenossen herhalten müssen (nicht erst seit »Jurassic Park«); woher es kommt, dass eine Krankheit wie ein Krustentier heißt; oder warum das Leben kein Ponyhof ist: Hier wird er fündig. Die Autorin von Ponyhof-Büchern, die der Autor in diesem Zusammenhang anführt, heißt allerdings nicht Ilse, sondern Lise Gast – ein verschmerzbarer Fehler.

Matthias Heine
MIT AFFENZAHN ÜBER DIE ESELSBRÜCKE
Die Tiere in unserer Sprache
Atlantik, Hamburg 2019
253 S., € 16,–



Freilich ist die Herkunft von Redensarten und Ausdrucksweisen heute oft nicht mehr eindeutig zu klären. Die »Hechtsuppe«, die beschreibt, wie es zieht, stammt vermutlich doch nicht vom jiddischen »hech« (wie) und »supha« (starker Sturm) ab – schade eigentlich. Auch ist das Kürzel »nt« für »non testatum« (nicht bezeugt) wohl nicht der Ursprung der berüchtigten Zeitungsente. Die Drohne hingegen, die uns in absehbarer Zeit die Pizza nach Hause liefern soll, hat – und da ist man nun recht sicher – nur vermeintlich etwas mit der männlichen Biene zu tun. In Wahrheit stand das tiefe Brummen des Motors, das im Englischen »drone« genannt wird, Pate.

Einige weitere Beispiele? Der Maulwurf wirft natürlich nicht Mäuler, sondern Haufen auf, wie der Vergleich mit dem altnordischen »mugi« (Haufen) lehrt. Der »Katzlmacher«, ein offenbar schon für das 18. Jahrhundert nachweisbares Schimpfwort für italienische Gastarbeiter, macht keine Katzen, sondern Kessel – genauer: »cazza«, italienisch dialektal für Zinngeschirr. So geht das immer weiter: Man liest ein Kapitel, dann noch eins, und ehe man sich's versieht, hat man den ganzen Band durch, einiges gelernt und sich dabei prächtig amüsiert. Ein Buch wie eine Tüte Kartoffelchips, doch mit erheblich mehr Nährwert und ganz ohne unliebsame Konsequenzen für die Figur.

Die Rezensentin Vera Binder hat Sprachwissenschaft und Philologie in Tübingen studiert und ist Studienrätin im Hochschuldienst am Institut für Altertumswissenschaften der Universität Gießen.

CHEMIE

DIE WELT DER REAKTIONEN

Von Acryl bis Zelluloidfilm erklärt dieses Werk anschaulich, wie sich Moleküle zusammenfinden oder auch trennen.

Wie lässt sich mit einem Chemiebuch die Aufmerksamkeit von Laien erhaschen? Der Autor Theodore Gray und der Fotograf Nick Mann versuchen es mit spektakulären Fotos von saftig grünen Bambusschösslingen, ängstlichen Kätzchen oder Eisen-Schmelzöfen. Dazu mischen sie chemische Strukturformeln, Atommodelle und erklärenden Text. Es macht Spaß, in dem Werk zu blättern. Und genau das ist auch das Erste, was die meisten Leser(innen) tun werden: blättern und staunen, denn im Vordergrund stehen Hochglanzbilder und Illustrationen in satten und kräftigen Farben. In die eigentliche Lektüre werden die meisten erst danach einsteigen.

Der Band handelt von chemischen Reaktionen – im Labor, in der Küche, auf der Straße oder in der Natur. Die Leser erfahren etwa, wie in Pflanzen Zellulosefasern wachsen und sich vernetzen, warum »Zauberpapier« sich in Luft auflöst, wie das Klebereiweiß Gluten im Brot chemisch aufgebaut ist oder was im Ofen einer Eisenschmelze passiert. Die Beispiele haben oft Bezug zum Alltag und dienen dazu, grundlegende chemische Vorgänge vorzustellen und zu erklären.

Theodore Gray, Nick Mann
REAKTIONEN
Die faszinierende Welt der Chemie in über 600 Bildern
Edition Fackelträger, Köln 2019
224 S., € 30,–



Damit eine Reaktion überhaupt in Gang kommt, sind bestimmte Umweltbedingungen erforderlich. Hohe Temperaturen helfen meist. Lebewesen jedoch können ihre Körpertemperatur nicht beliebig erhöhen und benötigen daher Mechanismen, die auch bei Raumtemperatur gut funktionieren. Deshalb nutzen sie Proteine als reaktionsbeschleunigende Katalysatoren. Um den Lesern etwas über die räumliche Struktur von Proteinen zu vermitteln, haben sich die Autoren eine skurrile Fotomontage ausgedacht. Ein Kätzchen wehrt sich darin fauchend gegen eine riesige Schlange – und das, wie wir im Text erfahren, schnell und erfolgreich, obwohl seine Organe nicht mit siedenden Flüssigkeiten gefüllt sind. Dieses etwas seltsame Bild stellt in dem Buch zum Glück eine Ausnahme dar, die anderen Vermittlungsversuche erscheinen gelungener.

An anderer Stelle erklären die Autoren, wie Gras wächst. Eine vergrößerte Aufnahme aus dem Innern einer Pflanzenzelle zeigt, wie Zelluloseketten entstehen und sich zusammenfügen. Das ist ein eher langsamer chemischer Ablauf – genau wie das Trocknen von Farbe, das Gray und Mann detailliert erklären. Nebenbei erfahren die Leser hier, dass Latexfarbe nicht aus Latexgummi besteht, sondern eine Dispersion von Polymeren wie Acryl in Wasser ist. Und während sich Fingerfarbe für Kinder mit Wasser leicht lösen lässt, ist das bei Latexfarbe, bei der zwei verschiedene Lösungsmittel nacheinander verdampfen, schon schwieriger.

Spektakuläre Fotos von hochlodernden Stichflammen ziehen sich durch das Kapitel über schnelle Reaktionen. Diese laufen ab, wenn etwa Sauerstoff nicht nur aus der Luft zur Verfügung steht, sondern bereits in das Reaktionsmaterial quasi eingebaut ist. Geldscheine aus Pyropapier beispielsweise fackeln schnell und rußfrei ab; Zauberkünstler benutzen sie gern. Pyropapier besteht aus Nitrozellulose, in der Nitratgruppen verbaut sind. Diese instabilen Molekülteile zersetzen sich, sobald es etwas wärmer wird. Dabei wird Sauerstoff frei, der das Feuer noch mehr anfacht. Ein Prinzip, das früher zu verheerenden Bränden in Kinos führte, denn Zelluloidfilme bestehen ebenfalls aus Nitrozellulose. Bestrahlt von der heißen Lampe des Projektors, konnten sich die Filmrollen leicht selbst entzünden und abbrennen.

Die Stärke des Werks liegt in einer Kombination aus faszinierenden Fotos und erklärendem Text. Es ist allerdings fachlich nicht besonders tiefgründig und verbiegt Sachverhalte auch gern einmal ein wenig. Etwa wenn Gray schreibt, dass bei einer Kältepackung die kinetische Energie der Moleküle »irgendwie herausgesaugt« werde (später erklärt er den Prozess vertieft). Wer über einen teilweise amerikanisch-pathetischen

Schreibstil in sperriger Übersetzung hinwegsieht, findet ein kurzweiliges, unterhaltsames Werk mit bunten Abbildungen und ansprechend erklärten chemischen Abläufen vor. Das Interesse für die Chemie weckt der Band auf alle Fälle.

Die Rezensentin Katja Engel ist promovierte Ingenieurin der Werkstoffwissenschaften und Wissenschaftsjournalistin.

GESCHICHTE

KÖNIG DER WIDERSPRÜCHE

Den Preußenherrscher Friedrich II. als fürsorglichen Landesvater darzustellen, sei eine postum idealisierende Konstruktion, schreibt Historiker Tim Blanning.

Madame de Staël (1766–1817), französische Schriftstellerin, hellsichtige Essayistin und intime Kennerin Deutschlands, schrieb 1810, Preußen zeige ein »Doppelgesicht wie der Januskopf – ein militärisches und ein philosophisches«. Diese Ambivalenz hatte in Preußen offenbar eine lange Tradition, denn schon der berühmte Preußenkönig Friedrich II. (1712–1786) war ein durch und durch widersprüchlicher Charakter gewesen, wie der englische Historiker Tim Blanning in diesem Buch schreibt.

Nach einer Einführung in die Geschichte Brandenburg-Preußens und der Familie der Hohenzollern widmet sich Blanning seinem Protagonisten, beschreibt wichtige Etappen in Friedrichs Leben und stellt sie in den größeren Zusammenhang von dessen Regentschaft. Der Autor behandelt nahezu alle Aspekte: die traumatische Kindheit unter dem tyrannischen Vater; die unbeschwerten Kronprinzenjahre am Musenhof auf Schloss Rheinsberg; den völkerrechtswidrigen Überfall auf Schlesien kurz nach Friedrichs Regierungsantritt im Jahr 1740; den verlustreichen Siebenjährigen Krieg und den damit verbundenen Aufstieg Preußens zur europäischen Großmacht; die zwischen Österreich, Russland und Preußen beschlossene erste Teilung Polens sowie den Bayerischen Erbfolgekrieg (1778/79), der zwar ohne größere militärische Aktionen verlief, aber den fortdauernden preußisch-österreichischen Gegensatz verstetigte.

Die Stärke von Blannings Buch liegt in der analytischen Tiefe und Stringenz, mit denen es die Widersprüchlichkeit Friedrichs in nahezu allen Lebensbereichen erfasst. Aus einem außerordentlichen Wissensfundus über den Preußenkönig schöpfend, beschreibt der Autor seinen Protagonisten als einen schwer berechenbaren und rücksichtslosen Machtmenschen, der mit größter Beharrlichkeit seine ganz persönlichen Absichten verfolgte und dabei weder Risiken scheute noch seine territorialen Ressourcen an Menschen und Material schonte. Der gleiche Herrscher, in dessen Reich jeder nach eigener Fasson glücklich werden sollte, schränkte die Pressefreiheit ein und ging mit drakonischen Strafen gegen Deserteure und Andersdenkende vor. Damit kratzt der Autor am Bild des fürsorglichen Landesvaters. Wie der Autor überzeugend herausarbeitet, ging es Friedrich mehr um seinen eigenen Ruhm als um das Wohl seines Volks. Vieles, was der »erste Diener des Staats« innenpolitisch auf den Weg brachte, sei aus staatspolitischem Kalkül heraus erfolgt, die vermeintliche Bürgernähe eine postum idealisierende Konstruktion.

Tim Blanning
FRIEDRICH DER GROSSE
König von Preußen. Eine Biographie
C.H.Beck, München 2019
718 S., € 34,–



Dank profunder Kenntnis der Primärquellen gelingt es Blanning, ein differenziertes Bild Friedrichs herauszuarbeiten. Dies gilt insbesondere für die Frage nach des Königs sexueller Orientierung, die der Autor anhand bislang wenig beachteter Gedichte und Briefe erörtert. Gängige Erklärungsversuche, wonach sich der Kronprinz eine Geschlechtskrankheit eingefangen habe und der dadurch erforderliche chirurgische Eingriff ihn den Frauen entfremdet und seine homophile Neigung begünstigt habe, greifen Blanning zufolge zu kurz. Briefe mit unmissverständlichem homoerotischem Unterton, Friedrichs Beziehung zu seinem Kämmerer Fredersdorf sowie zu königlichen Pagen und Husaren deuten vielmehr auf ein homophiles Umfeld am Königshof mit bisweilen misogynen Tendenzen hin, wie der Autor schreibt. Friedrichs Hof in Potsdam sei für Frauen gewissermaßen eine No-go-Area gewesen. Selbst Friedrichs Hunde hätten bei Damenbesuch gebellt.

Zwiespältig sind Friedrichs Wirken als politischer Autor und sein Umgang mit Gelehrten. Blanning kann schlüssig nachweisen, dass die schriftstellerischen Ambitionen des Preußenkönigs im Wesentlichen davon geprägt waren, seinen Nachruhm durch ein von ihm präsentiertes und geschöntes Geschichtsbild abzusichern. So wie die Selbststilisierung als Philosophenkönig war auch seine angebliche spartanische Bescheidenheit nur Fassade. In Wahrheit pflegte Friedrich einen babylonischen Lebensstil und gab ein Vermögen für Schnupftabakdosen und höfischen Dekor aus.

Bei aller Kritik an Friedrich beschreibt Blanning seinen Protagonisten ebenso als einen klugen Monarchen, der als politischer Intellektueller hochkarätige historische Traktate verfasste, mit ungewöhnlichen Architekturkenntnissen ein beispielloses Bauprogramm bis hin zur Machtarchitektur des Neuen Palais vorantrieb, Kammermusik schrieb und praktizierte, die Berliner Akademie der Wissenschaften förderte und die Grundlagen für das großartige Gesetzeswerk des Allgemeinen Landrechts legte. Große Erfolge erzielte Friedrich auch bei der Ansiedlung ausländischer Bauern auf neu gewonnenem Ackerland. So gelang es zwischen 1746 und 1763, das Oderbruch zu entwässern, mehr als 1000 Familien auf dem erschlossenen Land anzusiedeln und Handwerker und Fabrikanten mit Zu-

schüssen und Steuerbefreiungen anzuwerben.

Wer Blannings Buch gelesen hat, wird einige Abstriche am traditionellen Bild des »Alten Fritz« machen müssen. Blanning hat ein gründlich recherchiertes, quellennahes und äußerst informatives Buch vorgelegt, das trotz erschlagender Materialfülle den roten Faden nicht verliert und den Preußenkönig in all seinen Licht- und Schattenseiten betrachtet.

Der Rezensent Theodor Kissel ist Althistoriker, Sachbuchautor und Wissenschaftsjournalist. Er lebt in der Nähe von Mainz.

TIERMEDIZIN
ZU TODE GELIEBT

Nicht artgerechte Haltung, Übertragung von Krankheiten und angezüchtete Merkmale, die zur Qual werden: was Menschen ihren Haustieren antun.

Achim Gruber
DAS KUSCHELTIERDRAMA
Ein Tierpathologe über das stille Leiden der Haustiere
Droemer Verlag, München, 2019
312 S., € 19,99



Viele Menschen halten Haustiere – und tun ihnen Schlimmes an, ohne sich dessen bewusst zu sein. Achim Gruber sieht die Folgen davon täglich auf seinem Seziertisch. Er leitet das Institut für Tierpathologie an der Freien Universität Berlin und hat neben zahlreichen Fachbüchern und -artikeln nun sein erstes populärwissenschaftliches Buch geschrieben. Darin schildert er, welch hässliche Konsequenzen die Unkenntnis, Gleichgültigkeit und Nachlässigkeit vieler Tierhalterinnen und Tierhalter haben. Insbesondere möchte er vor häufigen, meist unbewussten und ungewollten Fehlern im Umgang mit unseren irdischen Mitbewohnern warnen.

Tierpathologen sind sowohl Pathologen als auch Rechtsmediziner. Als Erstere untersuchen sie beispielsweise unklare Todesursachen und diagnostizieren Krankheiten etwa anhand von Biopsien. Besonders wichtig ist dabei, ansteckende und auf den Menschen übertragbare Infektionskrankheiten (Zoonosen) zu erkennen, da diese sich im schlimmsten Fall seuchenhaft ausbreiten können. Als Rechtsmediziner tragen Tierpathologen dazu bei, Verbrechen aufzuklären und speziell im Tierkaufrecht Mangel- und Gewährleistungsansprüche festzustellen.

Gruber hat also viel zu erzählen, und genau das tut er gleich zu Beginn seines Buchs, indem er seine Leser mit gruselig anmutenden Kriminalfällen konfrontiert. Da geht es beispielsweise um Messie-Wohnungen mit verwesenden Tierkadavern oder um Wasserleichen von Hunden, die jemand loswerden wollte, indem er sie an Steine band und im Fluss versenkte. Das ist nichts für schwache Nerven: In die zahlreichen Abgründe der menschlichen Natur zu schauen, kann empfindsame Seelen durchaus belasten. Als Leser sollte man insbesondere mit bildhafter Sprache wie »eimerweise Eiter« oder »knöcheltiefer Darminhalt« zurechtkommen. Doch der Autor will niemanden abschrecken, stattdessen für mehr Verständnis und Verantwortungsgefühl unseren Haustieren gegenüber sorgen.

Einerseits nehmen unsere tierischen Mitbewohner immer mehr die Rolle von Sozialpartnern ein, teilen nicht nur das Heim, sondern auch Tisch und Bett (und manchmal sogar die Herztabletten) mit ihren Haltern, andererseits müssen sie – oft aus menschlicher Unkenntnis heraus – erhebliches Leid ertragen. Das äußert sich etwa in einer nicht artgerechten Haltung und Fütterung, tritt aber ebenso ein, wenn das Kuscheln mit dem Chinchilla zum Todeskuss wird. Denn eine für den Menschen weitgehend harmlose Infektion wie der Lippenherpes kann für Kaninchen und Chinchillas letal verlaufen.

Auch andersherum kann aus Tierliebe großes Leid werden, wenn zum Beispiel lebensbedrohliche Infektionskrankheiten vom Tier auf den Menschen überspringen. Gruber erzählt beispielhaft die Geschichte eines Ehepaars, das aus Mitleid einen Straßenhund aus Marokko illegal nach Deutschland eingeführt hatte. Kurze Zeit später stellte sich heraus, dass das Tier an Tollwut litt (anders als in Deutschland ist diese virale Erkrankung in vielen Mittelmeerländern noch nicht ausgerottet). Alle Kontaktpersonen des Ehepaars mussten sofort geimpft und sämtliche Tiere, die mit dem Hund potenziell in Berührung gekommen waren, eingeschläfert werden, sofern sie nicht nachweislich einen lückenlosen Impfschutz besaßen.

Ein Thema, das dem Autor sehr wichtig ist, sind »Qualzuchten«, denen er sich im letzten Drittel des Buchs widmet. Während in früheren Zeiten vorwiegend auf Leistung, Arbeitsaufgabe und Charakter gezüchtet wurde, steht bei heutigen Haustieren oft das Aussehen im Vordergrund. Kurznasige Gesichter mit glubschigen Kulleraugen, die perfekt dem Kindchenschema entsprechen, kommen bei Käufern gut an. Dabei ist den meisten vermutlich nicht bewusst, dass die Tiere unter solchen angezüchteten Veränderungen oft sehr zu leiden haben. Eine zu kurze Nase etwa erschwert Hunden das Atmen und hindert sie daran, an heißen Sommertagen ausreichend zu hecheln, um sich abzukühlen. Da gezüchtet wird, was gekauft wird, sieht Gruber hier eine große Verantwortung bei den Kunden, die mit ihren oft uninformierten, rein emotionalen Vorlieben das Tierwohl mit beeinflussen.

Gene, die ein erwünschtes Merkmal wie eine bestimmte Fellfärbung hervorbringen, sind häufig mit angeborenen Krankheiten assoziiert und werden deshalb Defektgene genannt. Sie ließen sich mittels Zucht eigentlich leicht eliminieren, was die Frage aufwirft, warum das nicht schon längst geschehen ist. Grubers Erklärung dazu ist bezeichnend: Gerade »defektgezüchtete« Tiere rufen bei ihren Haltern ein ausgeprägtes Bindungsverhalten hervor; der von Natur aus vorhandene Pflegetrieb des Menschen werde durch kränkelnde Schützlinge offenbar besonders gut befriedigt.

Das Buch ist sehr aufschlussreich und fesselnd. Da verzeiht man Gruber auch gern seine hier und da durch-

scheinende Arroganz, die nicht untypisch für seinen Berufsstand ist und sich etwa darin äußert, nachher immer alles besser zu wissen. Trotz einiger fachnaher Textpassagen ist das Buch im Großen und Ganzen auch für Laien gut verständlich.

Die Rezensentin Tanja Neuvians hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als Wissenschaftsjournalistin in Ladenburg bei Heidelberg.

DIGITALISIERUNG **IM KONSENS IN DIE ZUKUNFT**

Wie lässt sich die digitale Vernetzung für alle vorteilhaft gestalten? Ein Debattenbeitrag.

Ulrich Sendler sieht einen Zusammenhang zwischen dem Anwachsen populistischer, demokratiefeindlicher Strömungen in einigen westlichen Staaten und einer missratenen digitalen Modernisierung der Industrie in ebenjenen Ländern. In politisch bisher stabilen Staaten wie den USA und Großbritannien bröckelt derzeit das Vertrauen in die demokratischen Institutionen. Zugleich vollziehen sich dort ein Niedergang der Industrie und eine ungeregelte, bisweilen chaotisch fortschreitende Digitalisierung. Das verunsichert viele. Sendler sieht die Lösung in einem konsequenten, doch im gesellschaftlichen Konsens beschrittenen Weg in eine digitale Zukunft.

Ulrich Sendler
DAS GESPINST DER DIGITALISIERUNG
Menschheit im Umbruch – auf dem Weg zu einer neuen Weltanschauung
Springer, Wiesbaden 2018
298 S., € 24,99



In einem geschichtlichen Rückblick macht Sendler die heutige Demokratie als Ergebnis der Industrialisierung seit der Mitte des 19. Jahrhunderts aus. Wenn aber die Industrie nun mit etwas komplett Neuem konfrontiert sei, nämlich der weit reichenden Vernetzung von Menschen und Dingen, folge daraus, dass auch die Demokratie verändert werden müsse, so der Autor. Dies sollte in einer breiten politischen Debatte ausgehandelt werden: Wie werden die Daten jedes Einzelnen gesichert? Was dürfen autonom entscheidende Maschinen und was nicht? Was können soziale Netzwerke zum gesellschaftlichen Austausch beitragen? Ziel müsse es sein, schreibt Sendler, die Vernetzung für alle vorteilhaft zu machen. Sein Buch ist gut zu lesen und leistet einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierungsdebatte.

Der Rezensent Jürgen Scharberth ist Diplomgeophysiker und Technischer Redakteur in Braunschweig.

LESERBRIEFE

INTELLIGENZ ALS SACKGASSE?

Unser Kolumnist Michael Springer erörtert einen neuen Erklärungsansatz zur alten Frage, warum wir nichts von anderen intelligenten Lebensformen mitbekommen – selbst wenn diese in der Milchstraße verbreitet sein sollten. (»Aliens sind überall«, **Spektrum** April 2019, S. 27)

Oswald Feix, Kummerfeld: Michael Springer erwähnt gute Gründe für die Unwahrscheinlichkeit einer Begegnung mit Außerirdischen. Mir scheint aber, es gibt noch einen weiteren: Es ist eine chauvinistische Haltung, die uns lange Zeit glauben machte, der Mensch stelle die Krone der Schöpfung dar. Mehr noch, es spricht vieles dafür, dass der Zweig des *Homo sapiens* eine Sackgasse der Evolution ist. Der Verbrauch der verfügbaren Ressourcen in unserem Lebensraum übersteigt schon heute deutlich die verfügbaren Kapazitäten. Eine durchaus wahrscheinliche Folge davon ist die Vernichtung dieses Lebensraums. Nach einigen Millionen Jahren könnte dann eine andere Spezies die Regie übernehmen.

Es klingt hart und demütigend, eine solche Perspektive zu erörtern. Aber aus der Sicht der Gesundheit des Planeten ist es eine Krankheit, mit Intelligenzen belastet zu sein. Nehmen wir an, dass auch die vielen Kandidaten für belebte Planeten sich von solchen Leiden kurieren, dann gibt es wenig Chancen, dass wir auf extraterrestrische Intelligenzen stoßen. Wohlgemerkt, ich bin heilfroh, ein Element dieser pathogenen Viren zu sein. Als Schimpanse könnte ich nicht Springers Einwürfe lesen.

Auf der Suche nach Signalen außerirdischer Zivilisationen beobachten spezielle Teleskope (hier das Allen Telescope Array in den USA) vor allem den Radiobereich des elektromagnetischen Spektrums.



SETH SHOSTAK/SETI INSTITUTE

Leserbriefe sind willkommen!

Schicken Sie uns Ihren Kommentar unter Angabe, auf welches Heft und welchen Artikel Sie sich beziehen, einfach per E-Mail an **leserbriefe@spektrum.de**. Oder kommentieren Sie im Internet auf **Spektrum.de** direkt unter dem zugehörigen Artikel. Die individuelle Webadresse finden Sie im Heft jeweils auf der ersten Artikelseite abgedruckt. Kürzungen innerhalb der Leserbriefe werden nicht kenntlich gemacht. Leserbriefe werden in unserer gedruckten und digitalen Heftausgabe veröffentlicht und können so möglicherweise auch anderweitig im Internet auffindbar werden.

Hans-Joachim Dasting-Hussner, Koblenz: Auf der Erde gab es in der Vergangenheit – teils durch biogene Aktivitäten – mehrere Massenauslöschungen von Arten, und wir arbeiten gerade mit Hochdruck daran, dass es ein weiteres Massensterben gibt, das uns einschließen könnte. Nicht zu vergessen sind auch die geologischen, interplanetaren und kosmischen Katastrophen (Flächenvulkanismus, gigantische Asteroideneinschläge, nahe Supernovae et cetera), die uns hinwegraffen könnten. Mit all diesen Problemen haben sicher auch Außerirdische zu kämpfen, weshalb es gar nicht so unwahrscheinlich wäre, dass wir deswegen keine Aktivitäten beobachten, weil die meisten von ihnen schon ausgestorben sind und andere sich noch nicht so weit entwickelt haben.

Auch zu berücksichtigen wäre, dass alle chemischen Elemente, die für komplexes Leben notwendig sind, im All erst nach ungefähr 6 bis 8 Milliarden Jahren zur Verfügung standen. Setzt man voraus, dass intelligente Spezies zirka 4 Milliarden Jahre Evolution benötigen, könnten die ersten intelligenten Lebewesen erst 10 bis 12 Milliarden Jahre nach dem Urknall aufgetaucht sein. Dieser fand aber vor kaum 14 Milliarden Jahren statt. Mit anderen Worten: So viele Aliens können es gar nicht sein.

ÜBERSEHENE MACHT DER KULTUR

In dem genetischen und kulturellen Austausch mit konkurrierenden Frühmenschenarten könnte der Schlüssel für den evolutionären Erfolg unserer Spezies liegen. (»Die Letzte ihrer Gattung«, **Spektrum** April 2019, S. 30)

Frank Wohlgemuth, Tornesch: Das herausragende Merkmal des *Homo sapiens* ist kein anatomisches, sondern eine viel weitergehende Errungenschaft. Jeder anderen Art steckt die Nische, die sie besetzt, im Genom. Der Mensch dagegen muss nicht nur individuell lernen, wie er seinen Lebensunterhalt bestreitet, er muss sogar lernen, was ihm schmeckt. Unsere Art verlagert das Wissen über die Welt vom Genom in die Kultur und erweitert hier die genetische Evolution um eine kulturelle. Damit kann *Homo sapiens* die Nische wechseln, ohne auf eine Mutation warten zu müssen.

Sobald die Sprache im heutigen Sinn da ist, setzt eine ungeheure Beschleunigung der Entwicklung ein, die sich auch im archäologischen Befund wiederfindet. Die kurze Meldung im Aprilheft »Vom Großwild- zum Affenjäger« (S. 9) erzählt ja genau die Geschichte von der Möglichkeit der kulturell bestimmten Wahl des Habitats und der Nische und damit auch die des Erfolgs unserer Art. Was sie von den anderen unterschied, war die Macht der Kultur, die durch keine Kreuzung erklärbar ist. Vor diesem Hintergrund wäre es vielleicht sinnvoller, die Spekulationen über Linienmusterartefakte nicht so stark zu bewerten und einmal zu versuchen, die Kulturgeschichte der unterschiedlichen Gruppen der Menschheit auf ihr Innovationstempo hin zu untersuchen. Der Beginn der gerichteten zweiseitigen Kommunikation mit dem neuen Medium Sprache, das zu einem Denken führt, das gleichzeitig abstrakt und gemeinsam ist, sollte am in evolutionären Maßstäben relativ plötzlich erhöhten Innovationstempo erkennbar sein. Das ist der Punkt, an dem der Mensch vernünftig wurde.

Alexander Braidt, München: Ein zentraler Fehler der **Spektrum**-Serie war schon bei Kevin Laland, Thomas Suddendorf und Christine Kenneally auffällig: Alle hantieren unbedarft mit dem Begriff *Homo sapiens*, ohne einwandfrei darzulegen, was den Menschen wesentlich zum Menschen macht und ab wann diese Eigenschaft auszumachen ist. Kate Wong, die eine neue Theorie der multiregionalen Evolution in Afrika vorstellen will, setzt diese Fehler fort und überträgt sie auch noch auf die Analyseergebnisse alter DNA durch deren Missinterpretation. Ihr zufolge entstünde *Homo sapiens* bereits vor 500 000 Jahren bei der Abspaltung vom mit dem Neandertaler gemeinsamen Vorfahren. Angeblich optimierte sich dieser frühe *Homo sapiens* rein graduell durch Kreuzung bis zum Gesamtpaket des modernen Menschen vor 40 000 Jahren.

Da die evolutionäre Anthropologie keine präzise Bestimmung dessen erarbeitet hat, was aus Homininen *Homo sapiens* macht – sie nimmt unerklärte Einzelsymptome wie verschachteltes Denken (Suddendorf) für das Entscheidende –, gerät sie stets in Versuchung, durch kleine, kumulative Schritte kooperativer Erfahrung von menschenähnlichen Vorfahren der Gattung *Homo* fließend zu *Homo sapiens* gelangen zu wollen. Alle ihre Vertreter in dieser **Spektrum**-Serie übertragen dabei in unzulässiger Weise das typisch menschliche Prinzip kultureller Entwicklung auf den primär biologischen Evolutionsprozess hin zum Menschen, der nur Mutation und Selektion kennt – keinesfalls eine Weitergabe erworbener kognitiver Eigenschaften.

Während der etwa zwei Millionen Jahre dauernden Evolution der Gattung hin zu *Homo sapiens* verdoppelte sich das Gehirnvolumen verschiedenster *Homo*-Varianten in etwa. Gleichzeitig optimierte sich die Faustkeilkultur des Acheuléen kaum. Wie lässt sich diese grundlegende Tatsache mit angehäufter Vererbung erworbener Erfahrung und verbessertem geistigem Austausch (ebenfalls Suddendorf) erklären? Und noch paradoxer: Nach zirka 100 000 v. Chr. evolviert das Gehirn von *Homo sapiens* nicht mehr – denn weltweit zeigen Ethnien, die seit Jahrzehntausenden getrennt blieben, das gleiche kulturelle Potenzial; dennoch macht von da an der Mensch – bisher belegt ab 80 000 v. Chr. – beschleunigt eine kulturelle Entwicklung durch.

Im Maiheft will uns **Spektrum** durch Michael Tomasello mit der gleichen inkonsistenten Theorie zur Anthropogenese in Gestalt der kulturellen Weitergabe abspeisen. Wäre es nicht an der Zeit, anderen gewichtigen Stimmen Gehör zu verschaffen, die zu Recht auf den erkennbaren, qualitativen Sprung hinweisen, durch den erst *Homo sapiens* sich kundtut? Ein qualitativer Sprung, der grundlegend das Prinzip biologischer Evolution von dem Prinzip kultureller Entwicklung trennt. Nur solch konträre Stimmen ermöglichen eine Debatte, die Licht ins Dunkel bringt.

Kate Wong verstärkt jedenfalls dieses Dunkel nur, statt es zu erhellen, indem sie graduell einen frühen *Homo sapiens* von 500 000 v. Chr. bis zum echten *Homo sapiens* um 40 000 v. Chr. evolvieren lässt. So gesehen zählten die Aborigines nicht zum modernen Menschen. Auf diese Spekulation eines fließenden Übergangs kann allerdings nur jemand kommen, der die nachweisliche Trennscheide zwischen Gattung *Homo* und *Homo sapiens* ignoriert, weil er nie verstanden hat, was den modernen Menschen ganz allgemein ausmacht.

Joachim Bodesheim, per E-Mail: Seit dem ersten Heft und über 40 Jahren Abo lese ich **Spektrum** der Wissenschaft. Seit einiger Zeit fällt mir auf, dass die guten alten Vorfahren, die »Hominiden«, zu »Homininen« geworden sind. Mich würde es interessieren, wann und aus welchem Anlass diese »Geschlechtsumwandlung« stattgefunden hat.

Antwort der Redaktion:
Die frühere Bezeichnung »Hominiden« für die Vorfahren des Menschen gilt inzwischen als veraltet, da auf Grund der engen Verwandtschaft hierzu auch die Großen Menschenaffen Gorillas, Orang-Utans und Schimpansen zählen. Zusammen bilden sie die Familie Hominidae der Säugetierordnung Primates. Hierin enthalten ist die Tribus Hominini, welche die Gattung *Homo* sowie die ausgestorbenen Vor- und Frühmenschen umfasst.

ERRATUM

»Das Wackeln und Zittern der Moleküle«, **Spektrum** Mai 2019, S. 40

Im Kasten »Molekülspezifische Vorlieben« (S. 44) fehlt beim dargestellten Naturstoff Miltiradien und seiner Vorstufe (in der Grafik blau gezeichnete Moleküle) eine Methylgruppe. Korrekt sieht Miltiradien so aus:

Die Überlebenden und die Geheilten

Was passiert, wenn die große Seuche besiegt ist?
Eine Kurzgeschichte von Andrew David Thaler

Meine Gelenke knacken, während ich mich die Treppe zu unserem Besprechungszimmer hinaufquäle. Ich lehne mich gegen die Wand, um Atem zu schöpfen. Natürlich hätte ich den Aufzug nehmen können und mir damit die Schmerzen erspart, aber ich muss gesund werden. Ich habe Glück. Obwohl die Krankheit meinen Körper verwüstet hat, kann ich noch gehen. Doch meine Beine sind schwach, meine Arme ausgemergelt, mein Gesicht vernarbt und hohlwangig. Ich bleibe in Bewegung, damit mein Körper weiter ausheilt. Dazu sind wir hier: um zu gesunden.

Allerdings weiß ich nicht, warum ich noch teilnehme. Mir nützen diese Treffen nicht viel. Früher spendeten sie Trost, aber jetzt sind sie bloß noch langweilig. Da die Überlebenden vor Kummer, Wut oder Ekel leicht die Beherrschung verlieren, können sie sich nur selten uns Geheilten gegenüber öffnen und ihre Erlebnisse mitteilen. Sie sind Kämpfer, das mussten sie sein. Ein Nichtinfizierter überlebte nicht, wenn er weich war. Sie verinnerlichten alles. Viele wurden so von Schuldgefühlen aufgefressen, dass sie nicht mehr weiterwussten. Selbstmorde von Überlebenden sind heute alltäglich.

Wir wussten nicht, was wir taten, während unsere Körper zusehends verfielen

Ich kann mich an überhaupt nichts erinnern. Wirklich. In einem Moment liegen meine Frau und ich fieberkrank im Bett und husten uns die Seele aus dem Leib, und im nächsten wache ich an ein Krankenhausbett gefesselt auf, mit verkümmerten Gliedmaßen und zerstörtem Körper. Es dauerte danach Tage, bis ich ahnte, was geschehen war, und Monate, bis ich damit klarkam. Mein Heim war von einer der vielen durch die Stadt tobenden Feuersbrünste vernichtet worden. Ich weiß bis heute nicht, wo meine Frau steckt und was aus ihr wurde.

Schweigend nehme ich Platz. Wir sind eine gemischte Gruppe aus nicht infizierten Überlebenden und geheilten Infizierten, die miteinander ins Gespräch kommen sollen, »damit die Heilung voranschreitet«. Die Treffen sollten offen und anonym sein, aber die Überlebenden wissen gleich, wer die Geheilten sind. Ein Blick auf unsere gebrochenen, verfaulten Körper genügt. Die meisten Überlebenden vermeiden, von sich zu erzählen. Früher brachte ich zu den Treffen ein Bild meiner Frau mit, in der schwachen Hoffnung, ein Überlebender würde sie erkennen, doch sie wollen nie ein Blick darauf werfen. Es fällt ihnen schwer, in uns wieder Mitmenschen zu sehen.

Ich verlasse das Treffen vorzeitig und ohne Begleitung. Wir Geheilte sind gern mit unseren Gedanken allein. Schließlich konnten wir eine lange Zeit gar nicht denken.

Beim Laden an der Ecke mache ich Halt, um ein bisschen Essen für Frau Richmond zu kaufen. Sie arbeitete als Krankenschwester, als die Seuche ausbrach und ihr Mann und ihr Enkel angesteckt wurden. Sie ist eine zähe, geradlinige Person, und nie sah sie sich Horrorfilme an. Während die Nachbarn Freunde und Verwandte erschossen, versteckte sie ihre Lieben unauffällig im Keller und fütterte sie, so gut es ging. Im Lauf der Jahre rettete sie Dutzende Infizierte, mich eingeschlossen, vor dem tobenden und zunehmend verzweifelten Mob.

Das kann nicht leicht gewesen sein. Einmal, erzählt sie mir, bekam ein früherer Nachbar, der nun die örtliche Bürgerwehr anführte, Wind von ihrer heimlichen Tätigkeit. Die Konfrontation endete nach einem zweitägigen Stellungskrieg zwischen ihr und vier oder fünf Milizangehörigen. Frau Richmond will noch immer nicht sagen, wie der Streit gelöst wurde. Sie ist zäh.

Ihr verdanke ich mein Leben. Mich um ihre Einkäufe zu kümmern, ist das Mindeste, was ich tun kann.

Herr Richmond begrüßt mich, als ich in seine Straße einbiege. Er war früher Arzt. Er und Frau Richmond lernten sich in dem Krankenhaus kennen, in dem die ersten Seuchenopfer angeliefert wurden. Obwohl seit Langem pensioniert, besuchte er seine Frau jeden Tag in der Mittagspause. Er war einer der ersten Infizierten, und sein Körper siechte mit den Jahren dahin, bis er im Rollstuhl saß und kaum sprechen konnte. Doch sein Geist ist klar, und das ist für uns alles, was zählt.

Seither wohne ich bei den Richmonds und schlafe noch immer auf einem kleinen Klappbett in ihrem Keller. Obwohl ich mich an die Zeit im Versteck nicht erinnere, fühle ich mich dort am sichersten.

Auf dem Bildschirm im Wohnzimmer laufen die Nachrichten. Noch ein Massenselbstmord von Überlebenden, die mit dem Sieg über die Seuche nicht klarkommen. Dieses Mal von der Brücke.

Man kann ihnen kaum einen Vorwurf machen. Wir Infizierten waren unersättlich. In unserem kranken Wahn brachten wir unzählige Nichtinfizierte um. Wir wussten nicht, was wir taten, während unsere Körper zusehends verfielen. Für die Überlebenden waren wir wandernde, langsam verwesende Leichen. Es muss entsetzlich gewesen sein. Die Nichtinfizierten nannten uns Zombies und begannen nach dem Vorbild gängiger Horrorfilme eine Ausrottungskampagne gegen uns. Es lief genau ab wie im Gruselkino: Horden von »Untoten« gegen eine zusammengewürfelte Gruppe von Überlebenden, die kaum eine Chance hatten.

Und dann fand jemand ein Gegenmittel. Auf einmal war alles anders: Die grauenhaften Untoten verwandelten sich in pflegebedürftige Kranke.

Wir wurden behandelt, und die Seuche war bald besiegt. Die Überlebenden nannten uns nun Geheilte. Wir haben keine Erinnerung mehr an die grässliche Welt, die durch die Krankheit entstand. Die meisten Menschen wurden damals zu bewusstlosen Zombies, welche die wenigen Nichtinfizierten durch eine filmreife Höllenlandschaft verfolgten.

Aber es waren die Überlebenden, die zu Monstern wurden. ◂

Nature 495, S. 276, 14. März 2013

DER AUTOR

Andrew David Thaler erforscht die Ökologie und den Schutz von hydrothermalen Quellen am Grund der Tiefsee. Für den populärwissenschaftlichen Blog »Southern Fried Science« (southernfriedscience.com) schreibt er über Meereswissenschaft.



Chefredakteur: Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser
Redaktion: Mike Beckers (stellv. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Robert Gast, Dr. Andreas Jahn, Dr. Verena Leusch (Volontärin), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier (Koordinator Archäologie Geschichte), Dr. Frank Schubert, Verena Tang; E-Mail: redaktion@spektrum.de
Freie Mitarbeit: Dr. Gerd Trageser
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Redaktionsassistenz: Andrea Roth
Assistenz des Chefredakteurs: Lena Baunacke
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel.: 06221 9126-600, Fax: 06221 9126-751, Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Geschäftsleitung: Markus Bossle
Herstellung: Natalie Schäfer
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel.: 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.de
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel.: 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Claudia Hecker, Dr. Michael Springer.
Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel.: 0711 7252-192, Fax: 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 8,90 (D/A/L), CHF 14,–; im Abonnement (12 Ausgaben inkl. Versandkosten Inland) € 93,–; für Schüler und Studenten gegen Nachweis € 72,–. PDF-Abonnement € 63,–, ermäßigt € 48,–.
Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52 6001 0070 0022 7067 08, BIC: PBNKDEFF
Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten Spektrum der Wissenschaft zum Vorzugspreis.
Anzeigen: Karin Schmidt, Markus Bossle, E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel.: 06221 9126-741
Eine Anzeigenbuchung ist auch über iq media marketing gmbH möglich. Ansprechpartnerin: Anja Väterlein, E-Mail: anja.vaeterlein@iqm.de
Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 40 vom 1. 1. 2019.
Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

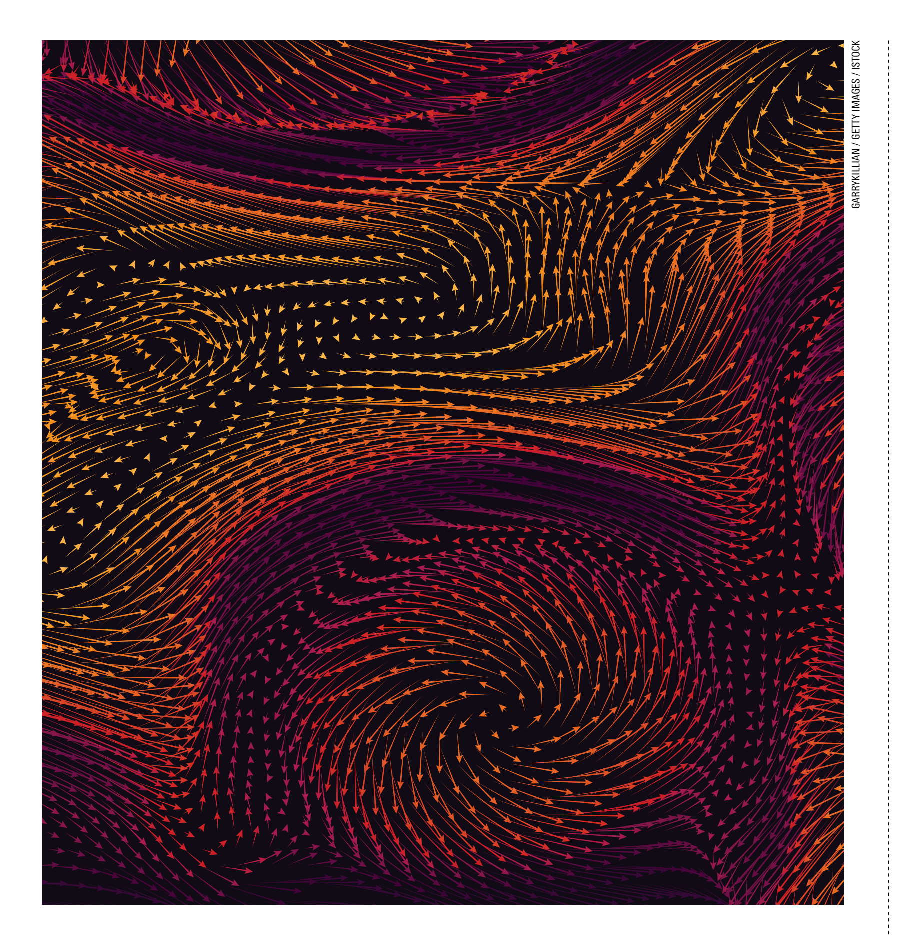
ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Dean Sanderson, Executive Vice President: Michael Florek





VORSCHAU



GARRYKILLIAN / GETTY IMAGES / ISTOCK

DOCH KEINE QUANTENGRAVITATION?

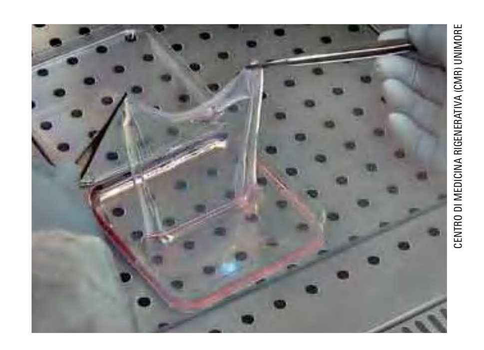
Bisher sind alle Versuche gescheitert, eine Quantentheorie der Gravitation zu entwickeln. Manche Physiker sehen inzwischen der Möglichkeit ins Auge, dass ihr Vorhaben gar nicht realisierbar ist. Sie erwägen eine Theorie, der zufolge die Schwerkraft wie von Einstein beschrieben kontinuierlich verläuft, während in der Teilchenphysik weiterhin alles in Häppchen auftaucht. Doch dazu müssen sie ihr Verständnis der Quantenphysik grundlegend überdenken.



NASA / JPL-CALTECH

DER EXOPLANET NEBENAN

Die Venus ist so groß wie die Erde und begann unter ähnlich lebensfreundlichen Bedingungen. Heute ist sie eine felsige Gluthölle. Was steckt hinter der unterschiedlichen Entwicklung der beiden Planeten?



CENTRO DI MEDICINA RIGENERATIVA (CMR) UNIMORE

HAUTERSATZ DURCH GENTHERAPIE

Mit genetisch verändertem, künstlich gezüchtetem Körpergewebe haben Mediziner einen Jungen gerettet, der an einer Erbkrankheit mit schwersten Hautschäden litt. Ähnliche Techniken könnten auch gegen Diabetes, Drogensucht und andere Störungen helfen.



BODNARCHUK / GETTY IMAGES / ISTOCK

NEUE SERIE

GOLD

Was treibt Menschen seit Jahrtausenden dazu, nach dem Edelmetall zu suchen und daraus die kunstvollsten Dinge herzustellen? Seit einigen Jahren fahnden Archäologen und Metallurgen, Kulturanthropologen und Historiker gemeinsam nach Antworten.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein? Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter